



João Filipe Santos Gomes

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de
Computadores

Sistema de Monitorização não Intrusiva de Cargas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: João Francisco Alves Martins, Professor auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Coorientador: Engenheiro Rui Amaral Lopes, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor Luís Manuel Camarinha Matos-FCT/UNL

Arguentes: Doutor Duarte de Mesquita e Sousa-IST/UTL

Vogais: Doutor João Francisco Alves Martins-FCT/UNL

Setembro, 2017



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Sistema de Monotorização não Intrusiva de Cargas

Copyright © João Filipe Santos Gomes, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e edito

Aos meus Pais, Padrinho, Madrinha e Namorada.

Agradecimentos

Pretendo nesta secção manifestar os meus agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a concretização do meu curso e da presente dissertação.

Em primeiro lugar gostaria de frisar o meu sincero obrigado ao meu orientador, Professor Doutor João Martins, e ao meu coorientador Engenheiro Rui Amaral Lopes, por todo o auxílio, disponibilidade, motivação e pelo apoio científico e moral evidenciado desde a primeira reunião.

Quero agradecer à minha família, nomeadamente aos meus pais e padrinhos, por todo o carinho e força que me deram ao longo de toda a minha vida, por todo o esforço económico que tiveram de fazer para que eu conseguisse alcançar todos os meus objetivos, pois sem eles nada disto seria possível. Agradeço também aos meus primos Tomé Vindima e Pedro Vindima por todo o apoio prestado e por terem sido a minha referência desde a minha infância, a eles um muito obrigado.

Um muito obrigado aos meus amigos de longa data, por todos os momentos e experiências vividas, em especial, ao Micael Duarte, Filipe Sebastião, Luís Amado, Luís Silva, Diogo Rosa, João António, Duarte Venâncio, Tiago Cordeiro e Saul Gomes. Um agradecimento também muito especial aos engenheiros da empresa KeyPlastics, Rui Sebastião, Nuno Olaio e Cristóvão Oliveira por todo o companheirismo ao longo deste período e por toda a atenção para comigo durante o estágio realizado.

Agradeço também aos meus amigos de faculdade, João Carreira, João Gomes, João Pacheco, João Morais, João Pombas, Tomás Deus e Adriana Mar por toda a ajuda disponibilizada nos momentos mais difíceis, pelos momentos partilhados e sobretudo pela amizade ao longo de todo este ciclo.

Por fim, um agradecimento de extrema importância, à minha namorada Patrícia Correia por todo o seu apoio, motivação, paciência, advertências, conselhos e sobretudo pelo seu amor e humildade, tendo sido um pilar fundamental para que conquistasse todos os meus objetivos.

Resumo

Devido ao crescimento do consumo energético a nível mundial, surgem preocupações relacionadas com as dificuldades de abastecimento, o esgotamento dos recursos energéticos e os impactos ambientais (alterações na camada de ozono, aquecimento global e outras alterações climáticas, etc.). A eficiência energética e o desenvolvimento de estratégias alternativas, como a aposta nas energias renováveis, a promoção de campanhas de eficiência energética e a monitorização de cargas elétricas, revelam-se parte da solução deste problema, mantendo um certo nível de conforto associado a uma redução de consumo e custos.

A eficiência energética nos edifícios pode ser aumentada através da mudança do comportamento dos seus utilizadores. O desenvolvimento sistemas capazes de extrair informações detalhadas de consumo, períodos de funcionamento dos dispositivos, custos e emissões de dióxido de carbono, poderá consciencializar os utilizadores por forma a alterarem o seu comportamento.

Partindo do cenário acima descrito, a presente dissertação apresenta o desenvolvimento de uma nova metodologia para identificação desagregada de dispositivos, bem como um sistema de monitorização não intrusiva de cargas, denominado por Monitor de Cargas Elétricas (MCE). O sistema desenvolvido apresenta a capacidade de desagregação de múltiplos dispositivos em funcionamento, sendo esta uma das contribuições originais do trabalho. Através do MCE, o utilizador tem acesso a várias informações acerca dos eventos ocorridos, isto é, dispositivos elétricos ligados e desligados, períodos de funcionamento, custos e emissões de CO_2 .

O algoritmo de desagregação de cargas desenvolvido e implementado no MCE, utiliza a Transformada de *Fourier* do sinal da corrente elétrica global como assinatura elétrica em combinação com um algoritmo genético. Ao longo das várias experiências efetuadas, o MCE apresentou uma taxa de sucesso global de 92% de reconhecimento dos dispositivos.

Palavras-Chave: Eficiência Energética, Monitorização não Intrusiva de Cargas, Transformada de *Fourier*, Algoritmo Genético.

Abstract

Nowadays, due to the rapid growth of the global energy consumption, concerns are arising regarding the depletion of energy resources and environmental impacts such as changes in ozone layer, global warming and others climate changes. Therefore, the concern for energy efficiency and the development of alternative strategies, such as the focus on renewable energies, the promotion of energy efficiency campaigns and the monitoring of electric charges, are part of the solution to this problem, maintaining a certain level of comfort associated with a reduction in consumption and costs.

Energy efficiency in buildings can be increased by adapting the behaviour of their users. The development of a system capable of extracting detailed information on consumption, devices operating periods, costs and carbon dioxide emissions, can make users aware of changes in your behaviour.

Starting from the scenario described above, this dissertation presents the development of a new methodology for load disaggregated load identification, as well as a non-intrusive load monitoring system, called Electric Charge Monitor (ECM). The developed system presents the capacity of disaggregation of multiple devices in operation, being this one of the original contributions of the work. Through the ECM, the user has access to various information about the events that occurred, that is, electrical devices on and off, operating periods, costs and CO_2 emissions.

The load disaggregation algorithm developed and implemented in the ECM uses the *Fourier* Transform of the global electric current signal as an electric signature in combination with a genetic algorithm. Throughout the experiments, the ECM presented an overall success rate of 92% of devices recognition.

Keywords: Energy Efficiency, Non-Intrusive Load Monitoring, *Fourier* Transform, Genetic Algorithm.

Índice Geral

ACRÓNIMOS	XVII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	3
2 ESTADO DA ARTE	5
MONITORIZAÇÃO NÃO INTRUSIVA DE CARGAS	5
2.1 MÉTODOS BASEADOS EM SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE BAIXA FREQUÊNCIA	6
2.1.1 <i>Variações na Potência Ativa e na Potência Reativa</i>	7
2.1.2 <i>Variações na Potência Ativa</i>	12
2.1.3 <i>Outros Métodos Não Convencionais</i>	13
2.2 MÉTODOS BASEADOS EM SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE ALTA FREQUÊNCIA	14
2.2.1 <i>Harmónicas do Sinal de Corrente no Transitório</i>	14
2.2.2 <i>Harmónicas do Sinal de Corrente no Estado Estacionário</i>	16
2.2.3 <i>Transformada de Fourier do Ruído da Tensão</i>	19
2.2.4 <i>Propriedades das Curvas V-I</i>	20
2.2.5 <i>Forma de Onda do Sinal da Corrente</i>	21
2.2.6 <i>Várias Características Microscópicas</i>	24
2.2.7 <i>Análise Tempo Frequência</i>	25
2.3 DISCUSSÃO	28
3 DESAGREGAÇÃO DE CARGAS BASEADA EM ALGORITMO GENÉTICO	31
3.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS	31
3.2 METODOLOGIA DESENVOLVIDA	36
3.3 TESTES EXPERIMENTAIS	39
4 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA	47
4.1 MODELO CONCEPTUAL	47
4.1.1 <i>Modelo Funcional</i>	47
4.1.2 <i>Modelo Arquitetural</i>	50
4.2 IMPLEMENTAÇÃO	52

4.2.1	<i>Tecnologias Utilizadas</i>	52
4.2.2	<i>Detetor de Eventos</i>	53
4.2.3	<i>Interpretador de Eventos</i>	59
4.3	INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL-DETECTOR DE EVENTOS	61
5	VALIDAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS	63
5.1	DETECTOR DE EVENTOS	63
5.2	INTERPRETADOR DE EVENTOS.....	73
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	79
6.1	SÍNTESE	79
6.2	CONTRIBUIÇÕES	80
6.3	TRABALHOS FUTUROS.....	81
	REFERÊNCIAS	83

Índice de Figuras

FIGURA 1.1-PRODUÇÃO ELÉTRICA MUNDIAL DESAGREGADA POR FONTE EM 2014, ADAPTADO DE [3].	2
FIGURA 1.2-CONSUMO DE ENERGIA PRIMÁRIA EM PORTUGAL EM 2014, ADAPTADO DE [6].	3
FIGURA 2.1-POTÊNCIA TOTAL EM FUNÇÃO DO TEMPO DEVIDO ÀS ALTERAÇÕES PROVOCADAS PELOS EVENTOS, ADAPTADO DE [10].	7
FIGURA 2.2-COMPORTAMENTO DOS DIFERENTES TIPOS DE DISPOSITIVOS, ADAPTADO DE [11]	8
FIGURA 2.3-ALGORITMO NIALM DESENVOLVIDO NO MIT [8].	9
FIGURA 2.4- DIAGRAMA BIDIMENSIONAL DAS ASSINATURAS, ADAPTADO DE [10].	10
FIGURA 2.5-ANÁLISE DA 3ª HARMÓNICA DA CORRENTE PARA A DISTINÇÃO ENTRE UM COMPUTADOR E UMA LÂMPADA, ADAPTADO DE [20].	15
FIGURA 2.6-HARMÓNICAS CARACTERÍSTICAS DE UM MONITOR DE UM COMPUTADOR, ADAPTADO DE [25].	17
FIGURA 2.7- FORMA DE ONDA DA CORRENTE E FFT DE UMA LÂMPADA FLUORESCENTE COMPACTA, RETIRADO DE [28].	18
FIGURA 2.8-FUNÇÕES GAUSSIANAS. A) RUÍDO DE BASE, B) RUÍDO PRESENTE QUANDO UM DETERMINADO DISPOSITIVO É LIGADO, C) ESPECTRO RESULTANTE DA DETECÇÃO DE UM EVENTO, ADAPTADO DE [32].	20
FIGURA 2.9-TRÊS TRAJETÓRIAS COM DIFERENTES DESFASAMENTOS. A) SEM DESFASAMENTO; B) DESFASAMENTO DE 30º; C) DESFASAMENTO DE 60º, ADAPTADO DE [26].	21
FIGURA 2.10-FORMAS DE ONDA DE UMA LÂMPADA FLUORESCENTE E DE UMA LÂMPADA INCANDESCENTE, ADAPTADO DE [34].	22
FIGURA 2.11-FORMA DE ONDA DO FUNCIONAMENTO DE UMA TORRADEIRA E DE UM SECADOR NO MODO FRIO COM UM SECADOR NO MODO QUENTE, ADAPTADO DE [34].	23
FIGURA 2.12-DIAGRAMA DO MECANISMO DE DECISÃO DO COMITÊ, ADAPTADO DE [38]	25
FIGURA 2.13-A) FORMA DE ONDA DA CORRENTE DE UMA TV B) TRANSFORMADA-S DO SINAL DA TV, ADAPTADO DE [42].	28
FIGURA 3.1-FLUXOGRAMA DE UM ALGORITMO GENÉTICO.	35
FIGURA 3.2-TRANSFORMADA DE FOURIER DO AGREGADO DE DOIS DISPOSITIVOS.	37
FIGURA 3.3- CROMOSSOMA BINÁRIO ILUSTRATIVO DE UM AGREGADO.	37
FIGURA 3.4-FLUXOGRAMA DO MÉTODO DESENVOLVIDO.	39
FIGURA 3.5-EXTENSÃO DE LIGAÇÃO PARA USO COM SONDA DE CORRENTE.	40
FIGURA 3.6-FORMA DE ONDA E FFT DO SECADOR.	41
FIGURA 3.7-FORMA DE ONDA E FFT DO MICRO-ONDAS.	41
FIGURA 3.8-FORMA DE ONDA E FFT DA TOSTADEIRA.	42
FIGURA 3.9-FORMA DE ONDA E FFT DA FERRAMENTA ELÉTRICA.	42

FIGURA 3.10-FORMA DE ONDA E FFT DA VARINHA MÁGICA.	43
FIGURA 3.11-FORMA DE ONDA E FFT DA CAFETEIRA ELÉTRICA.....	43
FIGURA 4.1-DIAGRAMA DE CASOS DE USO.	49
FIGURA 4.2-MODELO ARQUITETURAL DO SISTEMA.....	50
FIGURA 4.3-DIAGRAMA DE ENTIDADES E RELAÇÕES DO MCE.....	51
FIGURA 4.4-ROTINA ALGORITMO GENÉTICO.	54
FIGURA 4.5-FLUXOGRAMA REPRESENTATIVO DO ALGORITMO PRESENTE NO DE.....	55
FIGURA 4.6-ARDUINO DUE.	56
FIGURA 4.7-SENSOR DE CORRENTE STC013.	57
FIGURA 4.8-SHIELD SD COMPATÍVEL COM ARDUINO DUE.....	57
FIGURA 4.9-RTC DS1307.	58
FIGURA 4.10-DETECTOR DE EVENTOS-DE.	58
FIGURA 4.11-MÓDULOS CONSTITUINTES DO DE.	59
FIGURA 4.12-ESQUEMA DE RELAÇÕES ENTRE CLASSES DO IE.	60
FIGURA 4.13-AMBIENTE GRÁFICO DO IE.....	60
FIGURA 4.14-CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL DO DE.....	61
FIGURA 4.15-MONTAGEM EXPERIMENTAL DO DE NUMA SITUAÇÃO REAL.	62
FIGURA 5.1-FORMA DE ONDA E TRANSFORMADA DE FOURIER DO MICRO-ONDAS.	65
FIGURA 5.2-FORMA DE ONDA E TRANSFORMADA DE FOURIER DA TOSTADEIRA.....	65
FIGURA 5.3-FORMA DE ONDA DA FERRAMENTA ELÉTRICA E TRANSFORMADA DE FOURIER.	66
FIGURA 5.4-FORMA DE ONDA E TRANSFORMADA DE FOURIER DO HOLOFOTE.....	66
FIGURA 5.5-FORMA DE ONDA E TRANSFORMADA DE FOURIER DA CAFETEIRA ELÉTRICA.	67
FIGURA 5.6-RUIDO E TRANSFORMADA DE FOURIER PRESENTE NO SINAL DA CORRENTE.	68
FIGURA 5.7-AGREGADO COMPOSTO POR 4 DISPOSITIVOS, TESTE 10.	71
FIGURA 5.8-COMPARAÇÃO ENTRE A ASSINATURA REAL E ESTIMADA PARA O TESTE 5.	73
FIGURA 5.9-EVENTOS INTERPRETADOS PELO IE A PARTIR DOS EVENTOS REGISTRADOS NO ESTUDO 1 PELO DE, TABELA 5.2. ..	74
FIGURA 5.10-DIAGRAMA DE CARGA CORRESPONDENTE À SEQUÊNCIA DE EVENTOS INTERPRETADA PELO IE, RELATIVAMENTE À TABELA 5.2.	74
FIGURA 5.11-EVENTOS INTERPRETADOS PELO IE A PARTIR DOS EVENTOS REGISTRADOS NO ESTUDO 2 PELO DE, TABELA 5.3.	75
FIGURA 5.12-DIAGRAMA DE CARGA CORRESPONDENTE À SEQUÊNCIA DE EVENTOS INTERPRETADA PELO IE, RELATIVAMENTE À TABELA 5.3.	75
FIGURA 5.13-EVENTOS INTERPRETADOS PELO IE A PARTIR DOS EVENTOS REGISTRADOS NO ESTUDO 3 PELO DE, TABELA 5.4.	76
FIGURA 5.14- DIAGRAMA DE CARGA CORRESPONDENTE À SEQUÊNCIA DE EVENTOS INTERPRETADA PELO IE, RELATIVAMENTE À TABELA 5.4.....	76

Índice de Tabelas

TABELA 2.1-TABELA RESUMO DOS PRINCIPAIS MÉTODOS NILM.	28
TABELA 3.1-CROSSOVER.....	34
TABELA 3.2-MUTAÇÃO APÓS CROSSOVER.	34
TABELA 3.3-LISTA DE DISPOSITIVOS UTILIZADOS NAS EXPERIÊNCIAS.	40
TABELA 3.4-TESTES EFETUADOS À METODOLOGIA DESENVOLVIDA PARA VÁRIAS COMBINAÇÕES DE AGREGADO DE DISPOSITIVOS.	44
TABELA 3.5-DISPOSITIVOS IDENTIFICADOS.	45
TABELA 5.1-TABELA DE DISPOSITIVOS UTILIZADOS NOS TESTES.	64
TABELA 5.2-RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM 3 DISPOSITIVOS (ESTUDO 1).....	69
TABELA 5.3-RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM 4 DISPOSITIVOS (ESTUDO 2).....	70
TABELA 5.4-RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM 5 DISPOSITIVOS (ESTUDO 3).....	72

Acrónimos

Simbologia

AG	Algoritmo Genético
CDM	<i>Committee Decision Mechanism</i>
CW	<i>Current Waveform</i>
DE	Detetor de Eventos
DWT	<i>Discrete Wavelet Transform</i>
EDP	Energias de Portugal
EIG	<i>Eigenvalues</i>
EUA	Estados Unidos da América
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FSM	<i>Finite State Machine</i>
GD	Gestão de Dados
HAR	<i>Harmonics</i>
Hp	Horsepower
HVAC	<i>Heating Ventilation and Air Conditioning</i>
IALM	<i>Intrusive Appliance Load Monitoring</i>
IAW	<i>Instantaneous Admittance Waveform</i>
IE	Interpretador de Eventos

IPW	<i>Instantaneous Power Waveform</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MCE	Monitor de Cargas Eléctricas
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MLP	<i>Multilayer Perceptron</i>
NILM	<i>Non-Intrusive Load Monitoring</i>
NN	<i>Neuronal Network</i>
P	<i>Active Power</i>
Q	<i>Reactive Power</i>
RBF	<i>Radial Basis Function</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SD	<i>Secure Digital</i>
STFT	<i>Short-Time Fourier Transform</i>
STW	<i>Switching Transient Waveform</i>
SVM	<i>Support Vector Machines</i>
UEC	<i>Unit Energy Consumption</i>
UEC	<i>Unit Energy Consumption</i>

1 Introdução

Este capítulo inicial pretende proporcionar uma visão geral do documento, sendo apresentado o enquadramento e a motivação para a realização desta dissertação. Apresentam-se os objetivos subjacentes a esta dissertação, com base no desenvolvimento de uma nova metodologia e de um sistema, no âmbito da Monitorização não Intrusiva de Cargas. Por último, apresenta-se a estrutura do documento, descrevendo os principais tópicos abordados ao longo de cada capítulo.

1.1 Motivação

Nos dias de hoje, a eletricidade é um dos vetores de energia mais usados na sociedade moderna. Devido ao aquecimento global e às alterações climáticas, existe uma grande necessidade de utilizar a energia elétrica de forma mais eficiente. De maneira a precaver os consumidores para estas questões torna-se relevante a sua sensibilização face aos consumos dos aparelhos domésticos, ou até mesmo do consumo total de toda a habitação. Manter padrões de produtividade e de conforto enquanto se minimiza o consumo através de alterações de comportamento, deve ser um dos objetivos da sociedade atual.

Atualmente, existe um aumento constante na procura por fontes de energia renovável. De forma a otimizar estes esforços, medidas de sustentabilidade energética necessitam de ser tomadas para monitorizar, controlar e gerir todo o sistema de energia. A possibilidade de monitorizar e controlar a energia doméstica, pode motivar os consumidores a utilizar a energia de forma mais eficiente e sensata, tendo uma visão geral do consumo dos seus dispositivos [1].

Investigadores no domínio da energia, apontam que, devido à globalização e à povoação das zonas rurais, a procura de energia está a aumentar, podendo ser contida através de uma gestão adequada e eficiente. Os ambientes residenciais e comerciais, onde a gestão de energia é de vital importância são áreas fulcrais, visto que estes sectores consomem uma percentagem significativa da energia total produzida [1].

Quando o uso da energia é desagregado em residencial, industrial, comercial, agrícola, transporte e produção de eletricidade, o sector “residencial” é aparentemente pequeno. No entanto, o conjunto do uso doméstico da eletricidade e do transporte dentro do agregado familiar é muito superior. Nos EUA em 2012, o consumo de energia no sector “residencial” sem contabilizar o consumo doméstico de eletricidade representou 6% do consumo nacional, mas quando este é incluído, o sector passa a ser responsável por 21 % do consumo total de energia [2].

A maior parte da produção de energia elétrica, a nível global, provem de combustíveis fósseis, caminhando rapidamente para o esgotamento destas reservas. Este paradigma conduz a um aumento do custo da energia elétrica, onde os sistemas de Monitorização não Intrusiva de Cargas se tornam elementos chave para combater as ineficiências energéticas [1]. A Figura 1.1, representa as diversas fontes de produção de energia elétrica a nível mundial em 2014, verificando-se que a maior parte corresponde à produção com recurso ao carvão, apresentando uma percentagem de 39%.

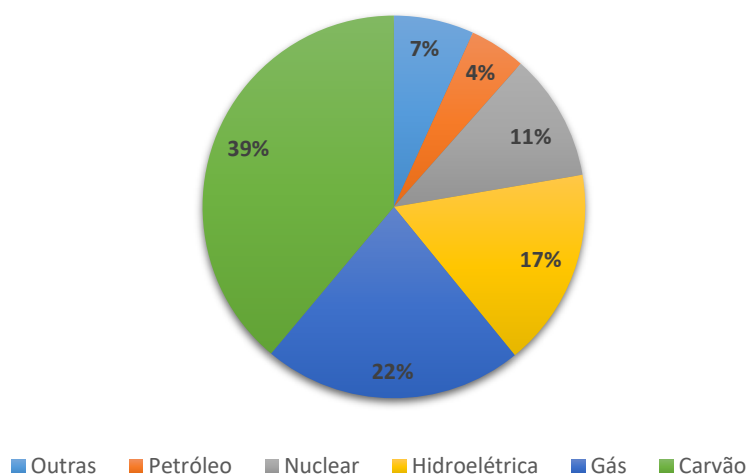


Figura 1.1-Produção Elétrica Mundial desagregada por fonte em 2014, adaptado de [3].

De modo a evitar o recurso excessivo aos combustíveis fósseis, é de extrema importância motivar os consumidores para uma maior eficiência energética, tanto em edifícios comerciais como no sector residencial. Um estudo [4] revela que pequenas alterações, utilizando as tecnologias convencionais, permitem reduzir o uso de energia entre 20% a 30% nos edifícios comerciais, diminuindo em média a pegada ecológica do edifício em 16 %. Outro estudo [5], revela que os efeitos relacionados com os sistemas de gestão de energia elétrica em edifícios, entre 1976 e 2014, conduziram a um aumento da poupança energética de 11,39% para 16,22% ao ano.

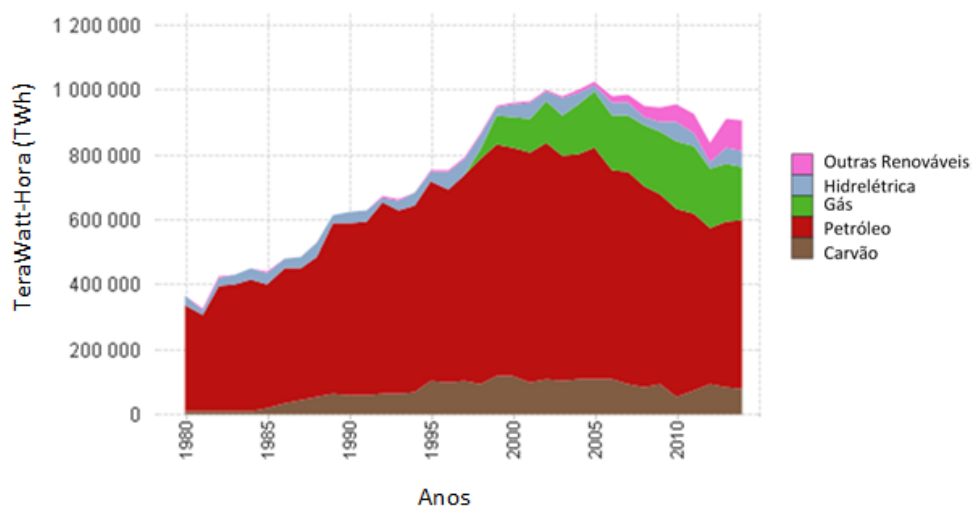


Figura 1.2-Consumo de Energia Primária em Portugal em 2014, adaptado de [6].

Como se pode verificar na Figura 1.2, em Portugal a procura de combustíveis alternativos, isto é, provenientes de fontes renováveis, tem vindo a aumentar. Complementarmente, o desenvolvimento de um sistema para a monitorização dos dispositivos elétricos, torna-se importante para fornecer dados relativamente ao consumo total e desagregado de cada instalação, sendo por isso uma mais valia para potenciar a eficiência energética, tanto nos edifícios comerciais como residenciais

1.2 Objetivos

Esta dissertação, tem como âmbito o estudo e desenvolvimento de um sistema de baixo custo para a Monitorização não Intrusiva de Cargas. O sistema deverá ser capaz de reconhecer, em tempo real, os dispositivos elétricos responsáveis por variações de consumo de uma determinada

instalação. Pretende-se que o dispositivo seja instalado no quadro geral do edifício, operando de forma autónoma. Este também deverá fornecer informações relativamente aos consumos energéticos do edifício, como os períodos temporais de funcionamento dos dispositivos e custos monetários associados.

Para identificação dos dispositivos, o sistema irá recorrer a um algoritmo genético e uma base de dados previamente elaborada com as diferentes assinaturas dos dispositivos, onde estas serão descritas pela sua Transformada de *Fourier* (FFT). É importante notar que o protótipo utilizará apenas um sensor de corrente para aquisição de dados. Todo o sistema deverá estar contido numa caixa plástica por forma a poder ser instalado por qualquer utilizador.

Em resumo, os objetivos deste trabalho são:

- ❖ Desenvolvimento da metodologia responsável pela identificação dos dispositivos;
- ❖ Elaboração de um sistema capaz de fornecer informações relativamente aos consumos dos dispositivos, custos e emissões de CO_2 ;
- ❖ Criação de um sistema de baixa complexidade, autónomo e de fácil instalação;
- ❖ Construção de um protótipo integrando a metodologia desenvolvida;
- ❖ Integração de todo o sistema numa caixa.

2 Estado da Arte

Monitorização não Intrusiva de Cargas

No que se refere à monitorização de cargas, os sistemas de monitorização dos dispositivos elétricos distinguem-se através da sua abordagem perante a aquisição de sinal, podendo esta ser intrusiva ou não intrusiva. O recurso a uma abordagem intrusiva *Intrusive Appliance Load Monitoring* (IALM), necessita que durante o processo de instalação do sistema, os dispositivos elétricos sejam desligados. Além disso, esta abordagem na maioria dos casos recorre a vários sensores, instalados em cada dispositivo, para efetuar a medição, como consequência torna-se por norma mais complexa dispendiosa. Por outro lado, a monitorização não intrusiva de cargas *Non-Intrusive Load Monitoring* (NILM) não implica que estas sejam desligadas para a instalação do sistema. Esta abordagem pode recorrer a um único sensor ou a vários, sendo estes normalmente instalados no ponto principal de entrada de energia elétrica do edifício, a que chamamos de quadro geral de baixa tensão (QGBT). Comparativamente à abordagem intrusiva, esta última apresenta uma vantagem clara visto que permite uma redução dos custos e da complexidade associada a todo o sistema. Como contrapartida, obriga a um processamento mais complexo.

Pode mencionar-se que, a monitorização intrusiva de cargas recorre a funcionalidades obtidas por recurso a *hardware* para recolha e tratamento de dados, exigindo elevados gastos. A monitorização não intrusiva também utiliza *hardware*, no entanto toma como base o desenvolvimento de *software* (no sentido de algoritmos) especializado onde é implementado um método responsável por caracterizar e monitorizar o comportamento elétrico de cada dispositivo, baseando-se nomeadamente no consumo total do edifício.

Desta forma, um sistema de monitorização não intrusiva de cargas apoia-se principalmente no estudo dos comportamentos elétricos dos dispositivos. Assim sendo, o ponto fulcral centra-se na elaboração de um algoritmo matemático para a desagregação de cargas, caracterizando individualmente o diagrama de carga de cada dispositivo e quantificando o seu consumo face ao consumo total da residência.

Cada dispositivo elétrico apresenta a sua impressão digital, a que vulgarmente chamamos de assinatura elétrica, analogamente aos seres humanos cada assinatura elétrica por norma é característica de cada equipamento (expeto se os dispositivos apresentarem carácter e potência iguais), ou seja, diferente de dispositivo para dispositivo, sendo constituída por uma ou mais características elétricas, estas podem ser derivadas de uma grandeza física ou obtidas por transformação matemática de um sinal.

Os métodos não intrusivos podem ser divididos em dois tipos, análise do estado estacionário caracterizado pela captação de dados a baixa frequência e análise do regime transitório associado a uma frequência de amostragem elevada, tipicamente superior a 1Hz. Relacionando as características elétricas com a frequência a que são amostradas podemos afirmar que, características elétricas adquiridas a baixa frequência, isto é, frequências inferiores a 1Hz, são definidas como características macroscópicas. Em oposição características obtidas a uma frequência superior são descritas como características microscópicas.

No âmbito da monitorização de cargas, importa ainda referir que um evento é caracterizado por uma variação de potência de um valor aproximadamente constante para outro e pela sua duração.

No seguimento do contexto acima descrito, descrevem-se nos seguintes subcapítulos vários métodos de aquisição de dados a baixa e alta frequência.

2.1 Métodos Baseados em Sistemas de Aquisição de Dados de Baixa Frequência

Métodos de baixa frequência (associados a características macroscópicas), baseiam-se geralmente em sistemas de aquisição de dados de baixo custo. O sistema é responsável por fornecer as informações necessárias para a formação das assinaturas elétricas macroscópicas. Exemplos destes sistemas são a Energy Box da EDP, Re:dy e The Energy Detective (TED).

Na próxima secção, apresentam-se alguns métodos de detecção não intrusiva de cargas baseados em diferentes características macroscópicas.

2.1.1 Variações na Potência Ativa e na Potência Reativa

A assinatura elétrica torna-se uma estrutura chave para identificação com precisão dos dispositivos elétricos. Seguindo este paradigma, o primeiro método NIALM ou NILM surgiu na década de 1980 [7], sendo publicado em 1992 por George W. Hart [8] do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). Este método permite monitorizar os dispositivos elétricos presentes numa habitação, recorrendo precisamente às alterações provocadas na potência ativa e reativa medidas por um sensor instalado no quadro elétrico. É possível monitorizar o consumo total do edifício com um período de amostragem de um segundo [9]. Sendo a potência total a soma das potências individuais de cada dispositivo, sendo possível também observar a sua contribuição [10], tal como se apresenta na Figura 2.1.

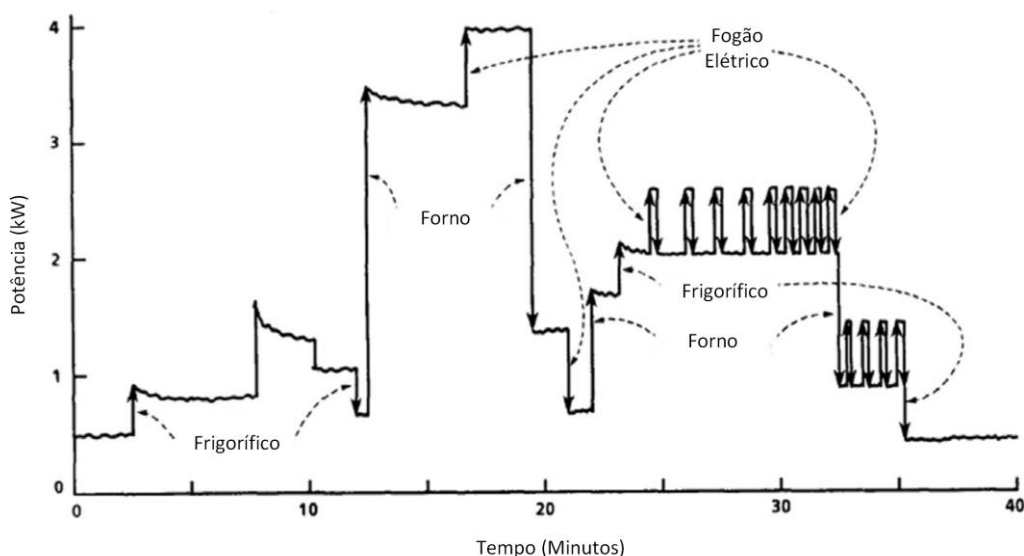


Figura 2.1-Potência total em função do tempo devido às alterações provocadas pelos eventos, adaptado de [10].

Foram sugeridas quatro categorias de dispositivos, associados ao seu perfil de funcionamento [10]. A categoria I é caracterizada por dispositivos de funcionamento do tipo ON/OFF, tendo apenas dois estados de operação: ligado ou desligado. Podem ser dados como exemplos desta categoria torradeiras ou lâmpadas. Na categoria II encontram-se os dispositivos compostos por vários estados de transição, sendo caracterizados por uma máquina de estados finita (FSM-*Finite State Machine*) onde cada estado é responsável por um determinado consumo de potência ativa e reativa. Estão nesta categoria as máquinas de lavar a roupa, lavar a louça e de secar roupa, onde

o seu consumo varia dependendo do modo de operação. Na categoria III encontram-se os aparelhos de consumo variável e estado não finito, onde as alterações de potência não são periódicas, tal como as lâmpadas de luminosidade ajustável e as ferramentas elétricas. Por último, a categoria IV é caracterizada por dispositivos de consumo permanente, como os alarmes de incêndio e as fontes de alimentação externas, estando ligadas 24 horas por dia e com um consumo de potência ativa e reativa praticamente constante. Estas categorias encontram-se representadas na Figura 2.2.

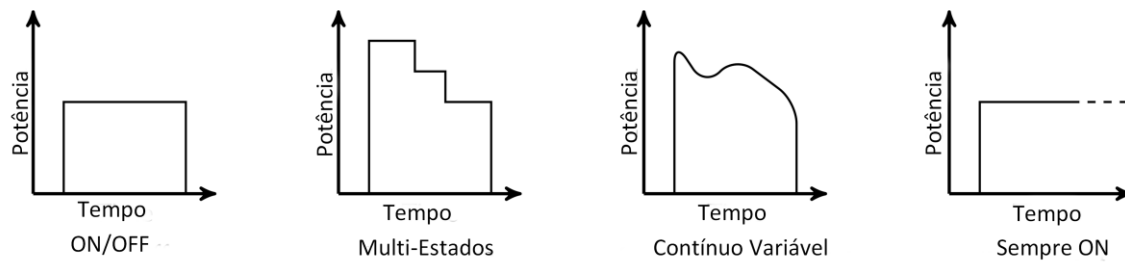


Figura 2.2-Comportamento dos diferentes tipos de dispositivos, adaptado de [11]

O algoritmo desenvolvido no MIT [10] [8] apenas aborda os dispositivos inseridos na categoria I e II, sendo o seu funcionamento detetado quando ocorre uma alteração da potência ativa e reativa de um valor constante para outro, sendo este novo valor também constante. Denomina-se por evento uma alteração de estados [11] sendo este caracterizado por uma variação de potência ativa e reativa. Para uma correta identificação dos dispositivos, é necessário conhecer a assinatura elétrica de cada dispositivo de modo a encontrar o perfil de carga correspondente.

O método NIALM é composto pelo modo manual e pelo modo automático. O modo manual necessita que as assinaturas elétricas sejam adquiridas de forma individual, implicando que os aparelhos sejam ligados e desligados individualmente. Obriga a um comportamento intrusivo, apesar de não requerer mais nenhum tipo de sensor. Em oposição, o modo automático utiliza as assinaturas elétricas contidas numa base de dados, evitando a intervenção do utilizador.

O algoritmo inicialmente proposto é constituído por oito etapas de acordo com o diagrama representado na Figura 2.3 [8].

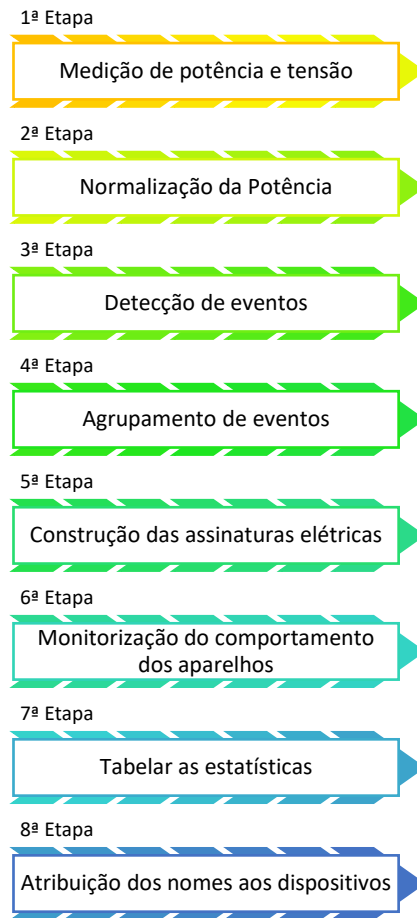


Figura 2.3-Algoritmo NIALM desenvolvido no MIT [8].

As 4ª, 5ª e 8ª etapa apenas são necessárias no modo automático. Caso o NIALM opere no modo manual o algoritmo resume-se às cinco etapas principais. A primeira etapa é responsável pela aquisição de dados a baixa frequência: potência e tensão. Após esta aquisição, a segunda etapa encarrega-se de normalizar o valor da potência adquirido, através da equação 2.1, com o intuito de reduzir a inconsistência na medição da potência provocada por flutuações da rede [10].

$$P_{normalizada}(t) = \left(\frac{\text{Tensão da Rede Elétrica}}{V(t)} \right)^2 P(t) \quad (2.1)$$

Na equação 2.1, V refere-se à tensão e P à potência onde a normalização dos dispositivos são baseados na admitância linear. Na terceira etapa, um sensor identifica as alterações de potência no estado estacionário, ocorrendo a detecção dos eventos. A quarta etapa é responsável pela análise e agrupamento dos eventos, localizando num plano bidimensional a assinatura elétrica, onde os eixos são respetivamente a potência ativa e reativa [10].

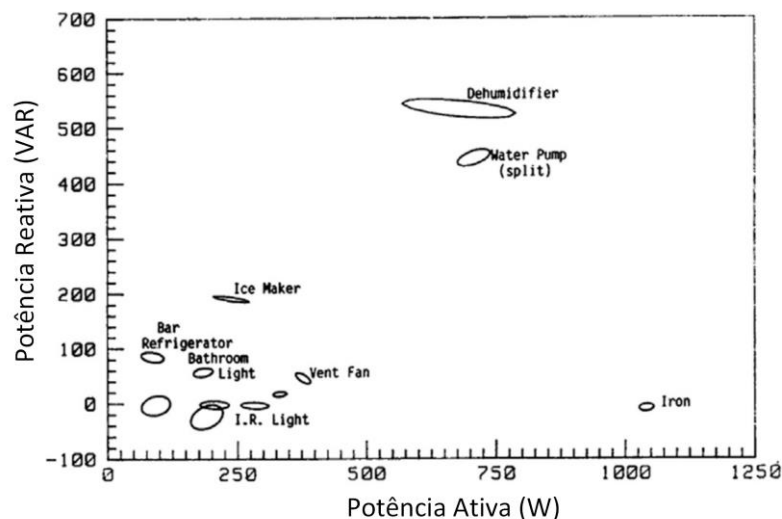


Figura 2.4- Diagrama bidimensional das assinaturas, adaptado de [10].

Relativamente à quinta etapa, esta cria as assinaturas elétricas dos dispositivos da categoria I e II, onde os dispositivos são agrupados em “clusters” de sinal positivo e negativo com magnitude semelhante, unicamente quando o sistema se encontra no modo automático. Apenas no modo automático, a sexta etapa assimila os eventos ocorridos às assinaturas elétricas correspondentes, sendo também caracterizada pela resolução de todos os problemas de paridade, garantido que todos os eventos são associados ao “cluster” correto ou a um novo [10]. Na sétima e penúltima etapa, são tabelados os vários níveis de consumo conhecidos, sabendo assim a contribuição de cada um dos dispositivos perante o diagrama total da habitação [10]. Por último, a oitava etapa limita-se a atribuir os nomes dos dispositivos presentes, tomando como base os dados adquiridos anteriormente.

Neste método referido é fácil identificar os dispositivos do tipo ON/OFF correspondentes à categoria I [8]. Contudo, problemas ocorrem quando se pretende detetar os dispositivos com vários estados de transição, isto é, máquina de estados finitos e dispositivos de consumo variável, pertencendo respetivamente às categorias II e III. Além disso, dispositivos de consumo similar podem não ser detetados, visto que, o algoritmo de deteção se baseia no pressuposto em que a variação de potência durante o arranque, corresponde à alteração negativa de potência quando estes são desligados [10]. Esta situação, torna bastante difícil o seu reconhecimento, sendo que muitos aparelhos alteram a sua resistência depois de se encontrarem ligados, podendo a potência consumida sofrer variações de 10 % ao longo do seu funcionamento. Quanto ao sucesso dos resultados, este método revela-se eficaz no reconhecimento dos dispositivos pertencentes à categoria I. No entanto, os dispositivos da categoria II não foram contemplados nos testes elaborados. Quanto aos dispositivos da categoria III e IV não foram abordados [12].

A comutação do estado de um dispositivo de OFF (desligado) para ON (ligado) ou vice-versa, corresponde a uma alteração entre dois estados estacionários. Durante esta transição ocorrem alterações nos sinais elétricos, as quais são características de cada dispositivo (o carregamento de condensadores através de uma fonte de alimentação de um computador é diferente da resistência do filamento presente numa lâmpada incandescente). As diferentes características extraídas dos sinais durante o transitório, correspondem a uma característica elétrica, sendo esta utilizada na construção das assinaturas elétricas [11].

Num contexto industrial, os dispositivos térmicos e de HVAC diferem daqueles que se encontram numa habitação comum. Este tipo de dispositivos originam problemas da qualidade da energia, tornando a sua monitorização importante para um sistema NILM [13]. De maneira a superar este problema, um grupo de investigadores do MIT adaptou o sistema desenvolvido, a edifícios comerciais e industriais [8]. Neste tipo de edifícios, encontram-se também motores incorporados com variadores de velocidade, isto é, dispositivos de consumo variável [12]. Um edifício comercial coloca problemas adicionais devido à correção do fator de potência, onde a potência reativa é reduzida, fazendo parecer os dispositivos resistivos. Por exemplo, uma lâmpada fluorescente com balastro eletrónico não possui potência reativa no estado estacionário, o que impossibilita a sua diferenciação de um aquecedor de uma máquina de café com valores similares de potência [14]

O sistema proposto em [14] utiliza a informação retirada dos sinais de controlo, a partir do sistema de automação do edifício. Assim, torna-se possível saber quando o dispositivo está ligado ou desligado, facilitando a identificação por parte do algoritmo de deteção das cargas, que não pertencem ao sistema de controlo. O sistema utiliza como assinatura elétrica a forma de onda do transitório associada à ocorrência de cada evento [12]. Alguns autores, afirmam que a deteção de cargas utiliza a combinação da potência ativa e reativa, bem como a forma de onda do transitório [14]. Esta metodologia apresenta vantagem face ao método anterior, apenas com recurso ao estado estacionário, no entanto, tem um maior custo associado ao processamento de sinal. Este sistema é também capaz de resolver sobreposição de eventos, quando não existem informações adicionais. Embora os sistemas de automação dos edifícios forneçam informações importantes, de modo algum são universais, pois normalmente, não controlam a maioria dos circuitos de iluminação e outros dispositivos. Outros problemas podem surgir como por exemplo impulsos associados a aquecedores a óleo, refrigeradores, fotocopiadoras e impressoras.

Outro estudo, utiliza uma técnica de monitorização de cargas com o recurso a uma rede neuronal combinada com um algoritmo genético [15]. As variações de potência ativa e reativa,

são as características utilizadas para identificação dos dispositivos. Inicialmente, o algoritmo genético é definido por uma população candidata com um determinado número de cromossomas, onde cada cromossoma caracteriza um indivíduo/dispositivo. Cada indivíduo corresponde a um conjunto de bits (*String*), onde cada bit representa um gene. Analogamente à seleção natural, também aqui sobrevive o indivíduo que possuir uma maior capacidade de se adaptar ao meio. Neste caso, existe uma função *fitness* que é responsável por atribuir uma pontuação a cada cromossoma, permitindo que os genes mais aptos passem para a geração seguinte. Utilizando este conceito, o algoritmo irá originar uma descendência de cromossomas até que este corresponda a um cromossoma semelhante ou igual, ao guardado na base de dados, isto é, o mais apto para a identificação da carga. Recorrendo ao algoritmo genético, resultados na identificação dos dispositivos, com precisões compreendidas entre 84,4% e 100%. Para a obtenção destes resultados foram elaborados quatro casos experimentais, utilizando motores de indução, duas cargas R-L, um desumidificador e um aspirador. São comparadas as precisões durante a desagregação das cargas, com o algoritmo genético e com recurso a uma rede neuronal. Em todos os casos estudados, o algoritmo genético permite a obtenção de melhores resultados, associada a uma redução do tempo computacional.

2.1.2 Variações na Potência Ativa

No método original de NILM desenvolvido no MIT referido na secção 2.1.1, são utilizadas como características elétricas, as potências ativa, reativa e transitórias (com frequências inferiores a 1 Hz), para a criação das assinaturas elétricas. No entanto, a aquisição de ambas as características (potências ativa, reativa e transitórias), implica um maior custo no sistema de aquisição de dados, embora menor que o custo associado aos métodos de alta frequência [10].

O método *Heurist End-Use Load Profiler* (HELP) [16] recorre a variações unicamente na potência ativa, sendo utilizado somente em dispositivos de grande consumo, tais como aparelhos de ar condicionado[12]. O algoritmo elabora uma leitura da habitação e regista a ocorrência dos vários eventos (e.g. funcionamento de dispositivos HVAC e aquecimento de água). A informação é fornecida sob a forma de perfis de carga de uso final e valores de consumo de energia do aparelho (UEC-*Unit Energy Consumption*). Após a recolha dos padrões de funcionamento de cada dispositivo, estes são combinados com suposições do comportamento diário dos clientes. Para casos onde existem dispositivos ligados com usos finais idênticos, são distinguidas com base nos padrões comportamentais do cliente, ou seja, a hora do dia em que ocorre, tipo de uso que ocorre e o padrão de uso. Para validar os resultados, o algoritmo executa testes sistemáticos, baseado num conjunto de regras associadas à energia consumida pelo aparelho em cada intervalo

de medição. Esta validação ocorre comparando o erro quadrático médio, o erro absoluto médio e o erro UEC. A leitura por parte do sistema ocorre a cada 15 minutos, o que de certa forma inviabiliza a quantidade de aparelhos identificados, pois um dispositivo elétrico pode ser ligado e desligado nesse intervalo sem que seja detetado.

No ano de 1999, surgiu um novo método onde o reconhecimento de padrões possibilita a desagregação do consumo da habitação. O método foi desenvolvido na Universidade de Concordia e utiliza apenas um único sensor de corrente instalado no ponto de entrada do edifício [17]. Este método requer uma medição individual de todos aparelhos alvo, a fim de recolher as características elétricas durante o período de treino, período correspondente a uma semana. Ao monitorizar o quadro elétrico principal, a variação da corrente elétrica de cada aparelho é observada. Por exemplo, para gerar uma hipótese sobre o dispositivo, são utilizadas as informações previamente recolhidas durante o período de treino. Devido à ocorrência de eventos ON/OFF é criada uma característica discreta associada ao “Sinal Inicial”, a qual é denominada por aumento, quando a corrente aumenta, ou por diminuição quando esta decresce. Com o reconhecimento preliminar dos dispositivos, esta característica discreta pode ser aplicada. A hipótese gerada pode ser falsa por dois motivos, o sinal produzido não é originado por um único dispositivo, mas sim por dispositivos simultâneos. Outra das causas ocorre quando o sinal inicial gerado por dispositivos diferentes é idêntico. Os dados de potência ativa são testados a cada 16 segundos e guardados em registo. Presume-se que não existem ocorrências de eventos simultâneos, isto é, dois dispositivos não são ativados ou desativados ao mesmo tempo, indicando assim que o início ou o fim de um evento não é sobreposto. Este algoritmo, utiliza as alterações na potência ativa, em combinação com um conjunto de regras de decisão específicas de cada dispositivo, permitindo assim identificar aparelhos de grande consumo, como frigoríficos e aquecedores de água. O presente método obteve bons resultados atingindo uma precisão de 80 %, no entanto obriga a um processo de treino exaustivo conforme descrito.

2.1.3 Outros Métodos Não Convencionais

O sistema denominado por RECAP (*RE*Cognition of *electrical Appliances and Profiling in real-time*), tem como intuito aumentar a eficácia dos métodos enumerados nas secções acima [18]. Este sistema, utiliza um monitor de energia (*ZEM-30 ZigBee*), o qual transmite a informação através de uma ligação sem fios para o dispositivo responsável pelo processamento e armazenamento de dados. O sistema distingue-se dos métodos anteriores, devido às inúmeras características elétricas que utiliza para a caracterização das assinaturas elétricas. São utilizadas 6 características elétricas macroscópicas, tais como, potência ativa, fator de potência, corrente

pico, corrente RMS, tensão pico e tensão RMS. O RECAP é constituído por três bloco. No primeiro o utilizador cria o perfil dos aparelhos gerando uma base de dados com as assinaturas elétricas. Seguindo-se um segundo bloco, onde as assinaturas elétricas são utilizadas para treinar uma rede neuronal, e por fim uma parte responsável por descrever todas as informações relativas ao consumo desagregado de cada carga. Desta forma, o utilizador poderá ter alterações comportamentais de forma e tentar reduzir o uso de determinado dispositivo, tornando-se mais racional no uso da energia elétrica de cada dispositivo.

Uma das vantagens do sistema, ao utilizar várias características elétricas, é a capacidade de distinguir cargas capacitivas, indutivas e resistivas através do fator de potência. Como cenário de teste, o RECAP foi testado numa cozinha real, revelando uma precisão superior a 84 % para todos os casos estudados. De forma geral, este sistema permite obter bons resultados no reconhecimento dos aparelhos pertencentes à categoria I, associado a um baixo nível de complexidade.

2.2 Métodos Baseados em Sistemas de Aquisição de Dados de Alta Frequência

Nas secções anteriores, foram descritos os métodos baseados em sistemas de aquisição de dados de baixa frequência, por oposição aos métodos de alta frequência são nesta secção.

Muitos dos investigadores afirmam que as características microscópicas dos sinais elétricos devem ser utilizadas simultaneamente com as características macroscópicas, com o intuito de alcançar uma maior precisão na deteção e monitorização dos dispositivos elétricos [19]. As características microscópicas estão relacionadas com as formas de onda do sinal elétrico e com as suas harmónicas.

2.2.1 Harmónicas do Sinal de Corrente no Transitório

A transformada de *Fourier* fornece um conjunto de harmónicas, que em combinação com outras características elétricas, como potência ativa e reativa, são importantes para a caracterização dos sinais elétricos.

Numa extensão ao método proposto no MIT [8], S. Leeb e L. Norford incorporaram informação sobre as harmónicas para caracterizar a assinatura elétrica, recorrendo à transformada rápida de *Fourier* (*FFT-Fast Fourier Transform*) [20]. Apenas os sinais transitórios são tomados em conta do ponto de vista da análise harmónica, permitindo assim distinguir alguns aparelhos

de consumo variável, tais como dispositivos de escritório. Neste estudo, os autores afirmam que a 3ª harmónica foi essencial para a distinção entre o sinal de uma fonte de alimentação de um computador e uma lâmpada incandescente. O sistema utiliza uma frequência de amostragem de 8 kHz, de maneira a processar as envolventes espectrais presentes na forma de onda da corrente durante o transitório. Para uma carga monofásica, a potência ativa e reativa correspondem à corrente em fase e em quadratura com a tensão, respetivamente. Assim, com o recurso à potência ativa, reativa e à 3ª harmónica do transitório é possível distinguir, por exemplo um computador de uma lâmpada incandescente, tal como exemplifica a Figura 2.5.

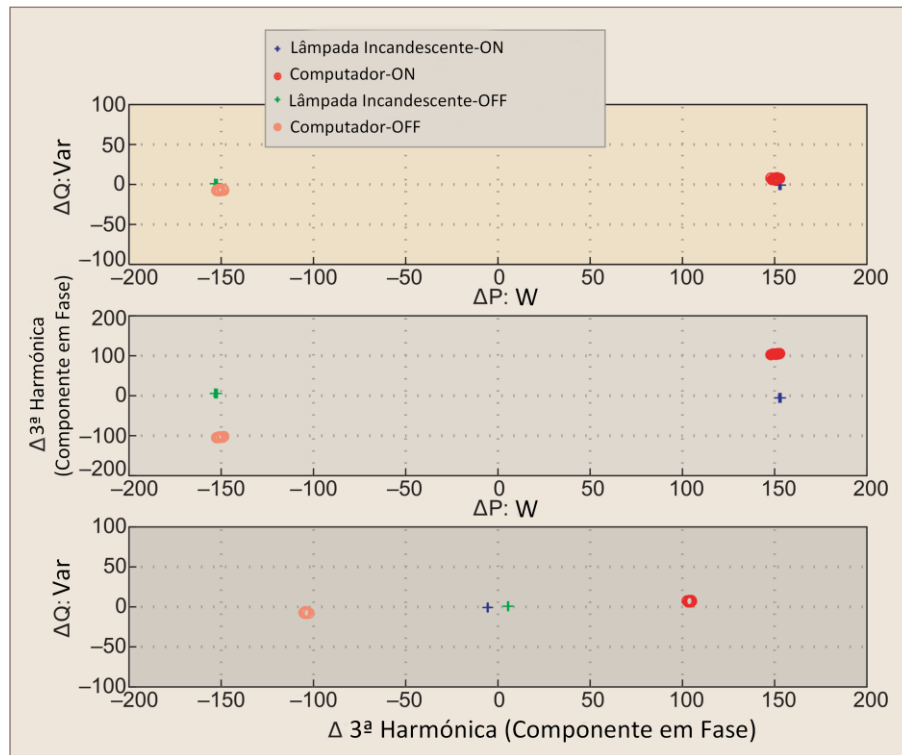


Figura 2.5-Análise da 3ª Harmónica da corrente para a distinção entre um computador e uma lâmpada, adaptado de [20].

No seguimento do método anterior, o mesmo grupo de investigadores desenvolveu um sistema de monitorização de cargas, assente nas componentes espectrais da forma de onda da corrente [21]. No entanto, nesta situação as componentes espectrais correspondem, a uma média do conteúdo harmónico observado pelo sistema de NILM. As componentes espectrais do sinal da corrente $x(t)$ são definidas por $a_k(t)$ e $b_k(t)$, onde $a_k(t)$ é constituído pelas componentes espectrais em fase e $b_k(t)$ pelas componentes em quadratura, o índice k refere-se ao número da harmónica [21].

$$a_k(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) \cos(k\omega\tau) d\tau \quad (2.2)$$

$$b_k(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) \sin(k\omega\tau) d\tau \quad (2.3)$$

A detecção dos dispositivos elétricos responsáveis por eventos, é efetuada por comparação com as assinaturas elétricas transitórias, presentes numa biblioteca, anteriormente adquiridas. O dispositivo elétrico que possuir menor erro quadrático, segundo o método dos mínimos quadráticos, é o responsável pelo evento [12]. Através desta abordagem, não é necessário registar os dados para todos os tipos de dispositivos, pois dispositivos diferentes dentro do mesmo tipo de categoria tendem a ter transitórios semelhantes [21], sendo o sistema capaz de identificar dispositivos dentro da categoria I, II e III [12].

Ao analisar a envolvente espectral, da forma de onda da corrente, baseada na *Fast Fourier Transform*, verifica-se a sua utilidade particularmente na detecção dos dispositivos variáveis. No entanto, estando este processo associado a uma grande quantidade de dados, por esta razão muitos autores limitam-se a identificar os dispositivos, não estimando o seu consumo [22]. De maneira a resolver este problema, K. D. Lee e W. Wichakool relacionam a 5ª e 7ª harmônica com consumo de potência ativa e reativa de um dispositivo de consumo variável [23] [24]. A robustez do conjunto das características, não foi avaliada na presença de dispositivos desconhecidos, o que impossibilita a comparação com outros métodos [22].

2.2.2 Harmónicas do Sinal de Corrente no Estado Estacionário

O método anterior revelou-se importante para a detecção de eventos durante o transitório, no entanto, apresenta a perda de alguns transitórios e a detecção de outros, que efetivamente não ocorreram. Desta forma, outros investigadores remetem o seu estudo recorrendo ao conteúdo harmónico no estado estacionário. Uma vez que, a magnitude e a fase das harmónicas no estado estacionário se mantêm constante, é assim possível a criação de assinaturas elétricas estáveis, baseadas nesta característica [12].

Srinivasan propõe um método com recurso às harmónicas da corrente no estado estacionário, usando uma abordagem baseada numa rede neuronal (NN) [25]. Na existência de vários dispositivos, são analisados os dados recolhidos a partir da análise de *Fourier*, da forma de onda da corrente, que foram utilizados para o treino da rede neuronal. O método abrange oito aparelhos, um computador, um monitor, uma televisão, uma lâmpada incandescente, uma lâmpada

fluorescente, um ventilador, um frigorífico e um carregador de bateria. O autor desenvolveu vários modelos de classificação baseados em NN, *Radial Basis Function* (RBF), *Multilayer Perceptron* (MLP) e *Support Vector Machines* (SVM), onde o SVM foi o que obteve melhores resultados.

Como descrito em [25], para cada representação a magnitude e a fase são convertidas em representação complexa, onde cada harmónica possui a parte real e a parte imaginária. Visto que, o vetor de entrada da rede neuronal é constituído por 16 sinais de entrada, são consideradas as 8 primeiras harmónicas sendo estas dadas pelas seguintes equações:

$$x_i = I_{\left(\frac{i+1}{2}\right)} \cos \varnothing_{\left(\frac{i+1}{2}\right)} \quad (2.4)$$

$$x_i = I_{\left(\frac{i}{2}\right)} \cos \varnothing_{\left(\frac{i}{2}\right)} \quad (2.5)$$

onde x_i corresponde à entrada da rede, sendo dada pela equação 2.4 para índices das harmónicas ímpares e pela equação 2.5 para pares. No seguimento do contexto anterior, I_n corresponde à magnitude da n-ésima harmónica ímpar e \varnothing_n à fase da n-ésima harmónica ímpar da corrente. Na Figura 2.6 é possível verificar a assinatura eléctrica de um monitor de um computador.

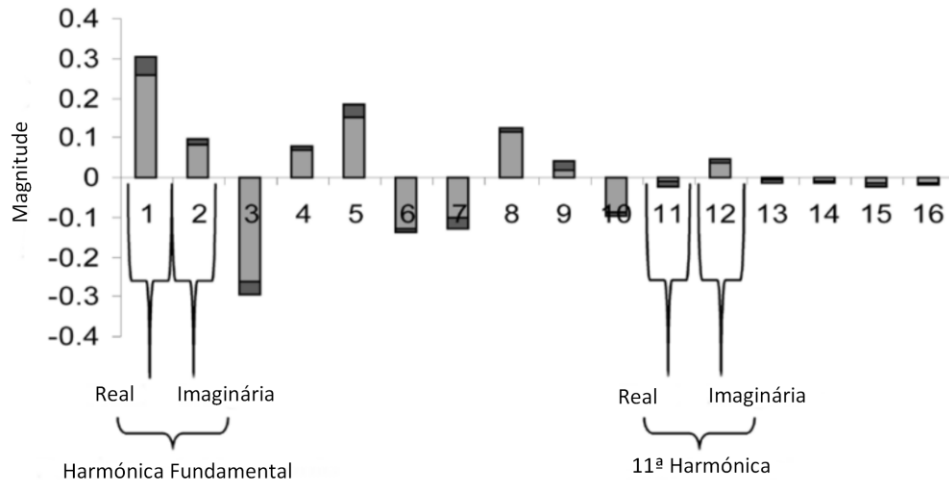


Figura 2.6-Harmónicas características de um monitor de um computador, adaptado de [25].

Segundo o autor este sistema é capaz de uma monitorização contínua, originando assim, múltiplas combinações entre os vários estados dos aparelhos, obtendo-se 2^N combinações possíveis. No entanto, o método apenas utiliza 8 dispositivos, levando a obter 256 combinações, pois para cada dispositivo apenas se consideram dois estados, ligado ou desligado [25]. A taxa de

sucesso do método está compreendida entre 80% a 90%. Num contexto habitacional, isto é, perante uma habitação onde o agregado de dispositivos ronda os 30 a 50, o processo de treino torna-se exaustivo, provocando problemas durante a implementação.

Existem várias pesquisas sobre outros métodos de monitorização com recurso a harmónicas, descritos em [26]. Os autores, afirmam que as harmónicas da corrente são características adequadas para identificar dispositivos eletrónicos, uma vez que estes dispositivos são não lineares e geram elevado conteúdo harmónico [27]. Akabar e Khan, recorrem ao espectro no domínio da frequência e à potência ativa e reativa para identificar os dispositivos não lineares [28]. Nesta situação, os autores melhoraram a assinatura elétrica, quer no domínio do tempo bem quer, no domínio da frequência, de modo a que os dispositivos não lineares sejam também identificados.

Em [28] uma carga linear é caracterizada por dispositivos, por exemplo, onde a forma de onda deste tipo de dispositivos não envolve harmónicas como motores e aquecedores. A forma de onda de corrente praticamente sinusoidal leva a que estes dispositivos sejam facilmente identificados num espaço de assinatura bidimensional [29], semelhante ao método do MIT descrito no subcapítulo 2.1 [8]. Por oposição, os dispositivos não lineares envolvem dispositivos eletrónicos, como computadores, impressoras ou lâmpadas fluorescentes compactas. Para dispositivos não lineares, quando é aplicado um sinal de tensão puramente sinusoidal, a forma de onda da corrente obtida apresenta uma grande quantidade de harmónicas, não sendo puramente sinusoidal. Assim sendo, torna-se bastante difícil identificar estes dispositivos num espaço de assinatura bidimensional

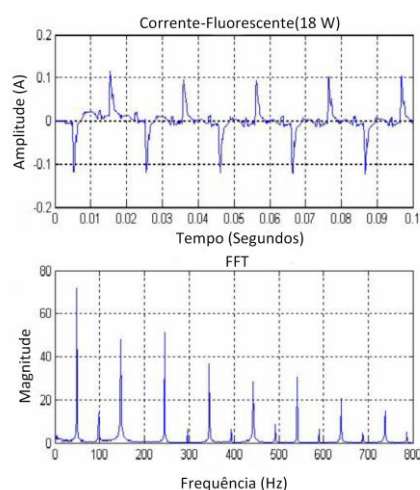


Figura 2.7- Forma de onda da corrente e FFT de uma Lâmpada Fluorescente Compacta, retirado de [28].

Um estudo recente autoria de K. Chahine , utiliza um método com recurso a um esquema de extração de características, no qual é construído uma base de dados de assinaturas [30]. Posteriormente, as assinaturas são comparadas através de métodos de aprendizagem supervisionada, utilizados na identificação dos dispositivos. Todos os métodos testados neste estudo possuem alta precisão na classificação dos dispositivos. Outro método proposto recentemente [31], elabora uma análise espectral da forma de onda, onde cada assinatura elétrica é constituída por três coeficientes espectrais distintos. A simplicidade do procedimento de configuração e identificação, revela-se importante para a monitorização online e em tempo real dos dispositivos, numa rede elétrica inteligente.

2.2.3 Transformada de *Fourier* do Ruído da Tensão

St. Patel, no ano de 2010, propôs um novo sistema de monitorização de cargas, baseado na transformada FFT do ruído presente no sinal da tensão como uma característica microscópica, denominado por *ElectriSense* [32]. O sistema considera um único sensor de tensão para detetar os eventos ocorridos numa habitação. A comutação abrupta de dispositivos elétricos, origina ruído elétrico que será detetado pelo sensor presente no sistema elétrico da habitação. Este poderá ser instalado em qualquer tomada elétrica do edifício, visto o ruído estar associado a toda a instalação [12]. A FFT do ruído é considerada como uma assinatura elétrica, onde os aparelhos requerem um processo de treino individual, tal como noutros sistemas de NILM.

No seguimento do contexto acima, o autor demonstra que os sinais de interferência eletromagnética (*EMI- Electromagnetic Interference*) são estáveis e previsíveis, permitindo ao *ElectriSense* a capacidade de distinguir dispositivos semelhantes [32]. Atualmente, a maioria dos dispositivos possui fontes de alimentação comutadas, o que origina sinais de interferência eletromagnética de alta frequência. Estes estão associados aos osciladores de frequência presentes nas fontes de alimentação. Neste método a análise de *Fourier* é aplicada aos sinais para uma gama de 36 a 500 kHz, sendo por isso o sistema capaz de detetar eventos com diversos intervalos de ocorrência, dependendo da frequência de amostragem e do tamanho médio da janela. Quando o sistema é iniciado, calcula a média entre 25 vetores de frequência, os quais são guardados como a assinatura de ruído base. Após este processo, é calculada uma nova janela de 25 vetores de frequência e um vetor de diferença entre o ruído atual e o ruído de base. Quando um dispositivo é acionado surge um novo vetor de ruído. O algoritmo de deteção de eventos percorre o vetor de diferença, de forma a encontrar valores que sejam superiores a um limite predefinido, sendo que no sistema em questão corresponde a 8 dB acima da linha de ruído de base [32]. Por fim, o vetor de ruído base é atualizado para um novo patamar, para que o próximo evento possa ser detetado.

As assinaturas de ruído são o inverso entre transições de estados opostos, isto é, uma assinatura associada à comutação OFF/ON é inversa de comutação de ON/OFF. Através da Figura 2.8, é possível observar o ruído base presente inicialmente no sinal da tensão, ilustrado pela Figura 2.8 a). A partir da Figura 2.8 b) observam-se as alterações provocadas no sinal da tensão quando existe a ocorrência de um evento. Após a ocorrência de um evento, o *ElectriSense* subtrai ao seu espectro atual o espectro do ruído base anterior, originando o espectro resultante representado na Figura 2.8 c) onde seguidamente é aplicada uma função gaussiana capaz de caracterizar o mesmo.

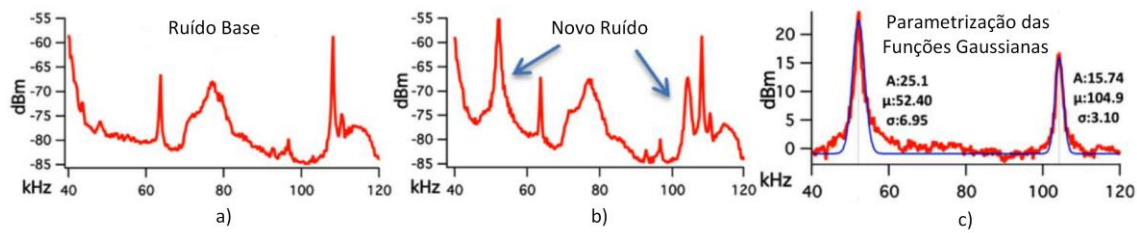


Figura 2.8-Funções Gaussianas. a) ruído de base, b) ruído presente quando um determinado dispositivo é ligado, c) espectro resultante da detecção de um evento, adaptado de [32].

O sistema *ElectriSense* apresenta vantagens face aos métodos anteriores, visto poder ser instalado em qualquer parte do edifício e permitir a distinção de dispositivos, com assinaturas elétricas semelhantes, com uma precisão na ordem dos 93,8%. No entanto, o método apresenta problemas de reconhecimento dos dispositivos, pois a assinatura elétrica pode ser afetada pela tomada em que o dispositivo se encontra ligado, caso esta não seja a mesma em que a assinatura elétrica foi recolhida. Também poderá ser afetada pelo ruído das habitações vizinhas caso o edifício seja um apartamento. Num contexto de monitorização de consumos, constata-se também que o *ElectriSense* não possui a capacidade de calcular o consumo de energia associado aos dispositivos identificados, sendo esta uma das limitações deste sistema.

2.2.4 Propriedades das Curvas V-I

A escolha das assinaturas elétricas, é um dos pontos fundamentais para a monitorização e deteção de dispositivos elétricos. Até ao momento, os métodos descritos têm recorrido às harmónicas durante o transitório, estado estacionário e à FFT do ruído da tensão.

No sentido de expandir os métodos de NILM, Lam propôs um método baseado nas curvas V-I, para a construção de assinaturas elétricas bidimensionais [33]. Inicialmente este recolhe as formas de onda de tensão e de corrente. Após a recolha são criadas as assinaturas elétricas na forma V-I, as quais são recolhidas e contruídas ao longo de um ciclo, quando os dispositivos se

encontram no estado estacionário. De seguida são extraídas características de forma, tais como, assimetria, área, orientação da curva, curvatura da linha média, área dos segmentos, auto intersecção e pico do segmento médio. Por fim, os dados das assinaturas são agrupados em *clusters* de dados similares, isto é, com assinaturas elétricas semelhantes.

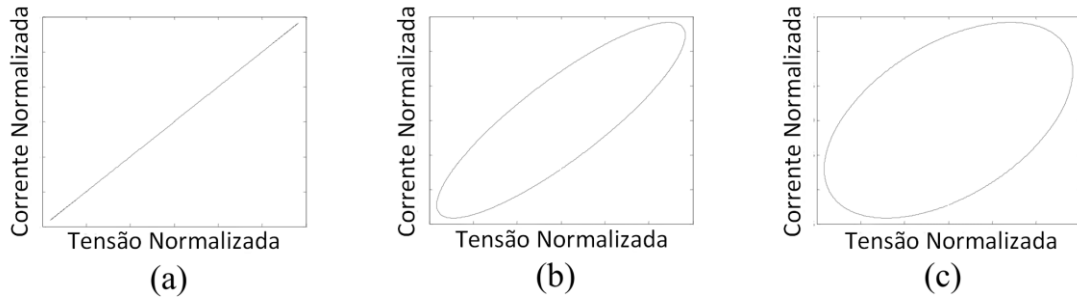


Figura 2.9-Três trajetórias com diferentes desfasamentos. a) Sem desfasamento; b) Desfasamento de 30°; c) Desfasamento de 60°, adaptado de [26].

A Figura 2.9 ilustra a relação entre a área e o desvio de fase. Quando o desvio de fase é igual a zero, a trajetória é uma linha reta com área igual a zero, como demonstra a Figura 2.9 a). Quando o desvio de fase é de 30°, ilustrado na Figura 2.9 b), a área é diferente de zero, originando uma trajetória elíptica. Por fim, quando o desfasamento é igual 60°, a elipse torna-se maior, implicando que a magnitude da área seja proporcional à magnitude do desvio de fase, atingindo o máximo em 90°, como apresentado na Figura 2.9 c).

Relativamente, ao desenvolvimento de um sistema com a utilização destas características, os autores não desenvolveram nenhum novo algoritmo, limitando desta forma a utilização destas propriedades.

2.2.5 Forma de Onda do Sinal da Corrente

Um estudo desenvolvido por S. Inagaki e T. Egami, apresenta um novo método de monitorização não intrusiva de cargas, onde é utilizada, como característica elétrica, a forma de onda da corrente [34]. A corrente total de uma habitação é constituída pela sobreposição de todas as correntes dos dispositivos em operação. Logo, durante o processo de identificação dos dispositivos, torna-se necessário recorrer a uma técnica de otimização, sendo neste caso a Programação Inteira. Esta técnica, efetua uma combinação entre as várias assinaturas elétricas de todos os dispositivos, de maneira a obter a corrente agregada da habitação. No entanto, para que seja possível identificar as várias assinaturas é necessário que estas sejam previamente recolhidas e guardadas, tal como no método inicialmente proposto pelo MIT [8], descrito na secção 2.1.1.

Por forma a validar o método, efetuaram-se testes durante 6 dias numa determinada habitação, onde se ligaram diferentes dispositivos. Porém, apesar dos resultados o sistema apresenta algumas falhas, onde as estimativas podem ser confundidas. A título de exemplo, a Figura 2.10 reflete um problema na precisão devido ao facto da forma de onda e magnitude entre uma lâmpada fluorescente e uma lâmpada incandescente apresentarem estas características semelhantes.

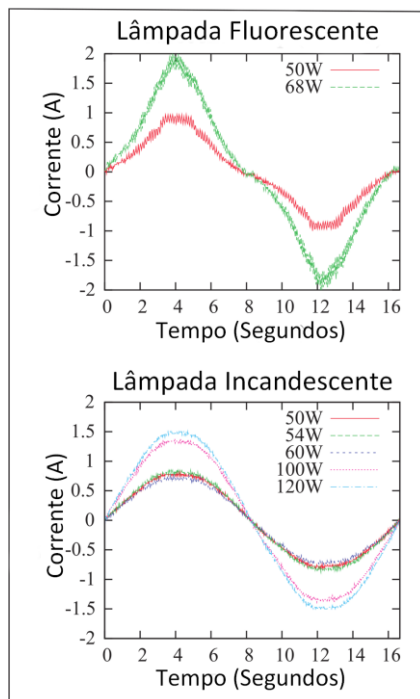


Figura 2.10-Formas de onda de uma lâmpada fluorescente e de uma lâmpada incandescente, adaptado de [34].

No seguimento do contexto anterior, é apresentado outro caso de insucesso originado pela confusão entre a combinação de dispositivos a funcionar em diferentes modos, quando estes originam formas de onda semelhantes. Este problema pode ser facilmente observado na Figura 2.11, onde a forma de onda de uma torradeira e de um secador a operar no modo frio, é semelhante à forma de onda do secador a funcionar no modo quente.

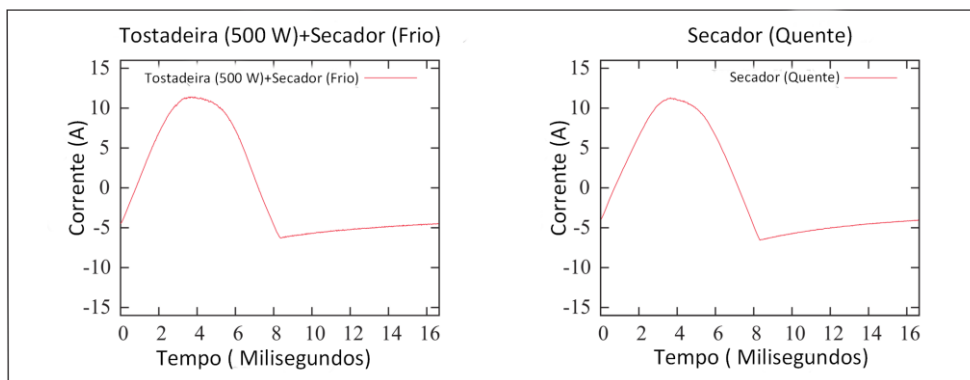


Figura 2.11-Forma de onda do funcionamento de uma torradeira e de um secador no modo frio com um secador no modo quente, adaptado de [34].

Outro estudo autoria de Y. H. Lin e M. S. Tsai, elaborado em 2011, recorre à forma de onda da corrente, desta vez durante o transitório [35]. O sistema extrai o sinal da corrente e utiliza a sua variação para a deteção dos eventos ocorridos. Também são utilizadas como características, a corrente pico e o fator de crista. Este sistema tem a capacidade de identificar os estados de maior e menor consumo de energia em cada dispositivo, quer nos cenários de um ou vários dispositivos em operação.

Como algoritmo de desagregação de cargas o sistema utiliza duas abordagens, uma com o recurso ao algoritmo de retro propagação do erro (algoritmo usado para aprender os pesos dos neurónios numa rede neuronal multicamada) e outra com o recurso a um algoritmo genético. O cenário de teste incluía uma lâmpada fluorescente, um rádio e um ventilador, simulando três ambientes diferentes e realistas. Em todos os casos estudados, o algoritmo genético apresenta melhores resultados, refletindo uma taxa de reconhecimento global acima de 92,5%. Estes resultados não são afetados pelos diferentes locais experimentais, o que confirma que o sistema NILM proposto é capaz de identificar o estado de utilização de cada aparelho de forma robusta.

Por fim, um sistema desenvolvido por Leung em 2007, recorre também à forma de onda da corrente e à sua FFT (10 kHz) [36]. Esta técnica, utiliza novamente um algoritmo genético para desagregação das cargas. Os autores afirmam que, o sistema possui 100% de eficiência para formas de onda da corrente não sinusoidais. No entanto, para a validação dos dados não foi encontrado nenhum teste experimental, o que leva a criar alguma dúvida acerca da eficácia deste sistema NILM.

2.2.6 Várias Características Microscópicas

Jian Liang propôs um método baseado em várias características elétricas microscópicas e uma característica macroscópica [38,39]. Com recurso a estas múltiplas características é possível abranger o regime transitório e o estado estacionário. As várias características elétricas microscópicas, são representadas pela forma de onda da corrente, pelas harmónicas do sinal da corrente, pela forma de onda da admitância instantânea e da potência instantânea, pelos valores próprios e ainda pela forma de onda do transitório da potência ativa. Quanto à única característica elétrica de carácter macroscópico, esta é composta pelas variações da potência ativa e reativa.

O método em causa, utiliza duas abordagens para a construção da base de dados, a primeira consiste em registar manualmente a assinatura elétrica de cada dispositivo. A segunda consiste num algoritmo capaz de classifica-los automaticamente. O sistema possui um banco de dados composto por 27 aparelhos típicos, com um total de 32 modos de operação, onde na situação em que todos os dispositivos se encontram ligados o consumo total atingirá aproximadamente 10 000 W (valor típico para um agregado familiar).

Para desagregação das cargas, o método utiliza as assinaturas elétricas presentes na base de dados e compara-as com as assinaturas que surgem quando um novo evento é detetado. Para associar um evento ao dispositivo responsável pelo mesmo, os autores recorrem a algoritmos de otimização e redes neuronais (reconhecimento de padrão). Com o intuito de melhorar a eficácia do método, os autores recorrem ao Mecanismo de Decisão do Comitê, combinando simultaneamente os resultados do algoritmo de otimização e da rede neuronal. Esta atualização, permite ao método obter uma precisão de 92,7% para o conjunto de aparelhos utilizados, melhorando em cerca de 10% os resultados obtidos, comparativamente com o recurso a um único algoritmo. Contudo, apenas são identificados dispositivos pertencentes à categoria I, limitando desta forma a utilização do método num contexto real.

A Figura 2.12 representa as quatro camadas do Mecanismo de Decisão do Comitê, a primeira camada é responsável por seleccionar o tipo de assinaturas elétricas. A segunda extrai as diversas características, referidas anteriormente no início deste subcapítulo. Na terceira camada, encontram-se os diversos algoritmos de desagregação e de reconhecimento de padrões. Por fim, a quarta camada é responsável por seleccionar a melhor solução encontrada para a ocorrência de determinado evento.

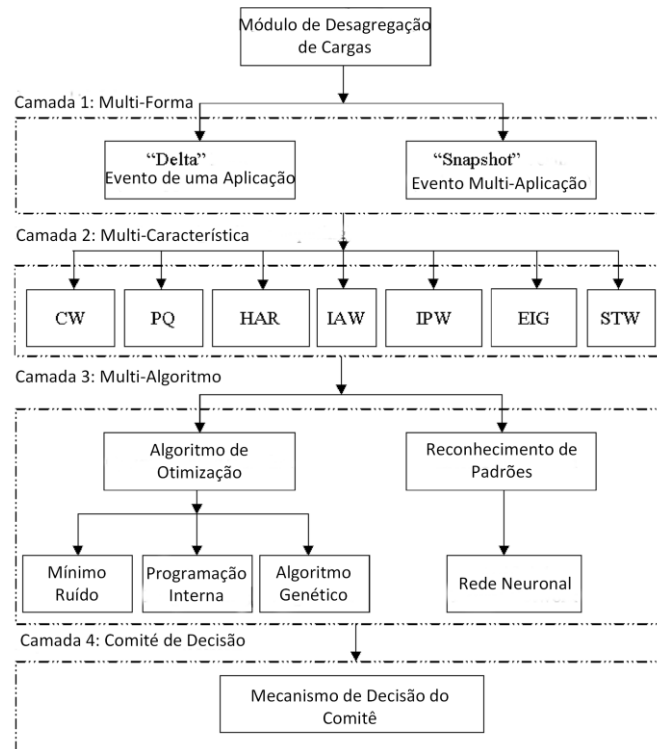


Figura 2.12-Diagrama do Mecanismo de Decisão do Comitê, adaptado de [38]

2.2.7 Análise Tempo Frequência

Descrevem-se de seguida os sistemas de NILM que recorrem à análise tempo-frequência, isto é, sistemas que utilizam fundamentalmente ferramentas matemáticas como STFT, Transformada de Wavelet ou Transformada S para a caracterização das assinaturas elétricas.

Y. C. Su e H. H. Chang, propõem um sistema de monitorização não intrusiva de cargas para *Smart Meters* [39]. Segundo este estudo, o cliente tem a possibilidade de obter o consumo energético dos dispositivos e o seu tempo de funcionamento, podendo assim melhorar os seus hábitos de consumo. O sistema recolhe os dados de tensão e corrente referentes ao consumo da habitação, sendo analisadas as características e o comportamento associado a cada um dos dispositivos. Para obter a assinatura elétrica, recorre à *STFT* das formas de onda da corrente durante o transitório e a Transformada de Wavelet. A *STFT* apresenta uma vantagem face à *FFT*, pois esta última não contém qualquer informação temporal do sinal original. Assim Dennis Gabor propôs quebrar o sinal amostrado em várias janelas mais curtas, aplicando a transformada discreta de Fourier (*DFT*), operação denominada de *Short-Time Fourier Transform (STFT)* [39]. Embora a Transformada de Fourier de curto prazo (*STFT*) contenha a informação do tempo, esta apresenta

algumas limitações inerentes, tais como a difícil escolha das funções das janelas e o intervalo de frequência.

No seguimento do contexto anterior, tanto a *Short-Time Fourier Transform (STFT)* como a *Discrete Wavelet Transform (DWT)* são aplicadas a três dispositivos diferentes : a dois motores de indução de 160 Hp e 123 Hp e um desumidificador de 119 W [39]. O funcionamento dos motores de indução é simulado através do pacote de software chamado *EMTP (Electromagnetic Transients Program)*, enquanto que o desumidificador é uma carga real. Considerando isto, os resultados da STFT e da DWT dos transitórios da corrente são analisados e comparados, onde os autores concluem que a transformada de *Wavelet* é superior à STFT na análise de cargas durante o regime transitório. Importa referir que este artigo demonstra através de dois estudos, que as escolhas de assinaturas de potência elétrica permitem reduzir o tempo de computação.

Um sistema semelhante desenvolvido por C. Duarte e outros autores, afirma que a transformada de *Wavelet* melhora bastante a precisão de identificação dos dispositivos, permitindo desta forma uma redução em vinte vezes o tamanho do vetor de entrada de dados do sistema [40]. Quando comparado com a análise de STFT, tal como referido, o tempo de processamento computacional também diminui nesta situação, o que revela claramente uma vantagem da utilização da Transformada de *Wavelet*. Neste seguimento H. H. Chang, propôs um novo sistema que utiliza o Teorema de *Parseval*, para calcular espectros de potência dos *WTCs (Wavelet Transform Coefficients)* em diferentes escalas, reduzindo assim efetivamente o numero de *WTCs*, e consequentemente reduz o espaço de memória computacional [41]. O sistema recorre ainda à utilização de redes neuronais, treinadas com base no erro quadrático médio entre a saída obtida e a desejada. As elevadas taxas de sucesso no reconhecimento dos eventos demonstram que, o algoritmo desenvolvido e proposto neste artigo é aplicável em situações de várias cargas de monitorização não intrusiva.

Em 2012, um grupo de investigadores da Universidade Nova de Lisboa apresentou um novo método de identificação de cargas não intrusivas para eletrodomésticos, suportado por uma ferramenta computacional [42]. Para a identificação dos dispositivos, o método utiliza a Transformada-S, onde os padrões obtidos permitem identificar dispositivos domésticos distintos. Quer os espectros de fase e magnitude, são úteis para a utilização da Transformada-S, pois esta produz uma representação tempo-frequência de um sinal no domínio do tempo, resultando unicamente num sinal dependente da frequência. Localizando desta forma, simultaneamente, o espectro real e imaginário. A utilização da Transformada-S permite a criação de contornos visuais, os quais podem ser classificados através de uma inspeção visual, contrariamente ao que

acontece com a Transformada de *Wavelet*, que requer métodos específicos como a análise padrão multi-resolução. De uma forma mais simples, a Transformada-S distingue-se de outras representações de tempo-frequência devido às informações de fase absolutamente referenciadas. A saída de uma Transformada-S é uma matriz na qual as linhas se referem à frequência e as colunas ao tempo, onde cada elemento da matriz é um número complexo.

Para o reconhecimento dos dispositivos, o método recorre à Transformada-S da forma de onda da corrente de cada um. A Transformada-S do sinal da corrente presente no quadro elétrico do edifício, com a Transformada-S presente na base de dados, sendo a que apresentar menor erro de magnitude será a identificada pelo sistema. Para que o dispositivo possa ser corretamente identificado é necessário a recolha prévia da sua assinatura elétrica e que esta seja guardada na base de dados.

O sistema foi aplicado com sucesso a dispositivos como uma tostadeira, uma batedeira, uma televisão e um micro-ondas, demonstrando assim a eficácia do método. O tempo de identificação, segundo os autores, é menor que 1 segundo. O sistema apresenta ainda uma simplicidade a nível de parâmetros, pois apenas a Transformada -S do sinal da corrente é utilizada. Além disso, uma vez que o Módulo de Processamento de Dados toma como referência o zero do sinal de tensão, o deslocamento da fase real da carga pode também ser identificado.

Recorrendo à Figura 2.13, é possível observar a forma de onda da corrente de uma televisão presente na Figura 2.13 a). Por outro lado, a Figura 2.13 b) ilustra a Transformada-S do sinal da corrente da televisão.

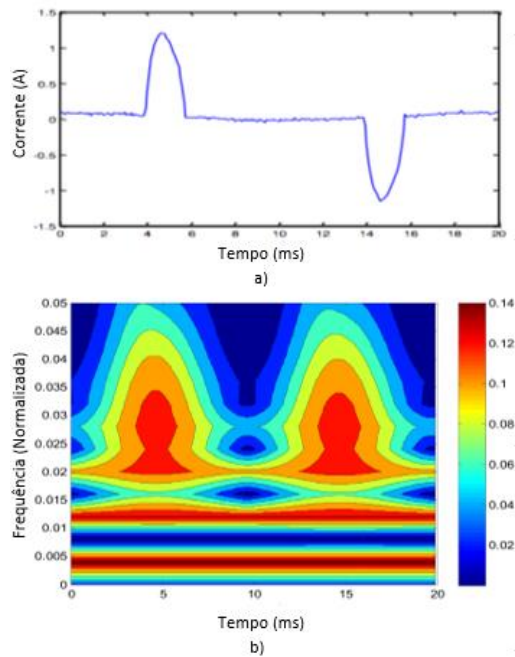


Figura 2.13-a) Forma de onda da corrente de uma TV b) Transformada-S do sinal da TV, adaptado de [42].

Outros estudos [43] [44], com recurso à Transformada-S, demonstram a supremacia desta ferramenta na precisão e na redução do tempo computacional, comparativamente à Transformada de *Wavelet*.

2.3 Discussão

De forma a resumir os métodos de monitorização de cargas descritos nos subcapítulos acima, são apresentados na Tabela 2.1 os principais métodos NILM e as suas características fundamentais.

Tabela 2.1-Tabela resumo dos principais métodos NILM.

Nome	Características Elétricas	Algoritmo de desagregação de Cargas	Complexidade	Precisão	Referências
NIALM	Potência Ativa e Reativa.	Alterações entre dois estados estacionários em combinação com uma base de dados.	Baixa	86%	[8]

Nome	Características Elétricas	Algoritmo de desagregação de Cargas	Complexidade	Precisão	Referências
-	Potência Ativa, Potência Reativa e Forma de onda do Transitório (Frequência menor que 1 Hz).	Base de dados em combinação com a Forma de onda do Transitório e variações de Potência.	Média	-	[14]
-	Potência Ativa e Reativa	Algoritmo Genético	Baixa	Entre 84% e 100%	[15]
HELP	Potência Ativa	Perfis de Carga em combinação com padrões de uso, registados numa base de dados	Média	-	[16]
-	Potência Ativa	Algoritmo de otimização em combinação com padrões de uso dos dispositivos, regras e variações de potência ativa.	Elevada	80 %	[17]
RECAP	Potência ativa, fator de potência, corrente pico, corrente RMS, tensão pico e tensão RMS.	Rede neuronal.	Baixa	Superior a 84%	[18]
-	Potência Ativa e Corrente.	Deteção dos eventos com base na análise espectral do transitório e Base de Dados.	Média	-	[20]
-	Forma de onda Corrente.	Análise espectral das Harmónicas da Corrente, recurso a uma biblioteca de assinaturas eléctricas.	Média	-	[21]
-	Potência Ativa, Reativa e Corrente (Harmónicas).	Combinação da potência ativa e reativa com e análise espectral.	Média	-	[23],[24]
-	Corrente (Harmónicas).	Análise espectral no estado estacionário e classificação dos dispositivos com base numa rede neuronal.	Elevada	Entre 80% a 90 %	[25]
ElectriSense	Tensão.	Diferença entre o ruído atual e o ruído base, em combinação com um conjunto de assinaturas eléctricas (FFT do ruído da tensão).	Média	93.8%	[32]
-	Tensão e Corrente.	Curva V-I.	-	-	[45]

Nome	Características Elétricas	Algoritmo de desagregação de Cargas	Complexidade	Precisão	Referências
-	Forma de onda da Corrente.	Programação Inteira.	Média	Entre 62,7% a 96,8%	[34]
-	Forma de onda da Corrente no Transitório.	Algoritmo Genético e Retro Propagação do Erro.	Média	92,5%	[35]
-	FFT da Forma de onda da Corrente.	Algoritmo Genético.	-	-	[46]
CDM	Forma de onda da corrente, harmônicas do sinal da corrente, forma de onda da admitância e potência instantânea, valores próprios, forma de onda do transitório da potência ativa.	Algoritmo de Otimização e Rede neuronal.	Média	92,7%	[38],[38]
-	Forma de onda da Corrente.	Comparação com as assinaturas presentes na base de dados. Assinaturas compostas pela STFT e Transformada de Wavelet.	Média/Elevada	-	[39]
-	Forma de Onda da Corrente.	Redes neurais treinadas com base na assinatura elétrica composta por coeficientes Wavelet.	Média/Elevada	-	[41]
EDReco	Potência Ativa, Reativa e Forma de Onda da Corrente.	Base de dados com assinaturas compostas pela Transformada-S do sinal da Corrente.	Média Elevada	-	[42]

Como se pode observar na Tabela 2.1, a maioria dos métodos recorre à forma de onda da corrente e a transformações matemáticas por de forma a caracterizar as assinaturas elétricas. No entanto, a generalidade dos métodos utiliza algoritmos que exigem um longo período de treino e elevada complexidade. Apenas um estudo, efetua uma abordagem recorrendo a algoritmos genéticos, utilizando a FFT da forma de onda da corrente, mas não foi encontrado qualquer resultado experimental acerca veracidade do método [46]. O presente trabalho recorre à Transformada Rápida de *Fourier* da forma de onda da corrente e a um algoritmo genético para desagregação de cargas para obtenção de um sistema preciso e de baixa complexidade.

3 Desagregação de Cargas Baseada em Algoritmo Genético

Neste capítulo é proposta uma nova metodologia para desagregação de cargas com recurso à Transformada de *Fourier* e um Algoritmo Genético. Para a maioria dos métodos abordados no Capítulo 2, é complicado desagregar um conjunto de dispositivos elétricos em funcionamento, simultâneo. Este novo método é capaz de efetuar a desagregação de múltiplas cargas em simultâneo.

3.1 Conceitos Fundamentais

Os algoritmos genéticos foram inventados por John Holland [48] em 1975, o que conduziu à publicação do seu livro “*Adaption in Natural and Artificial Systems*”. Estes algoritmos são baseados nos processos genéticos dos organismos biológicos, ao longo de várias gerações de populações. Analogamente ao indicado por Charles Darwin em *Origem das Espécies* os algoritmos genéticos são capazes de evoluir para as melhores soluções. Estes algoritmos simulam processos que são essenciais para a evolução tal como acontece na natureza, onde os indivíduos de uma população competem uns com os outros por recursos como, água, abrigo ou alimento. Aqueles indivíduos que possuem uma maior aptidão terão maiores chances de sobreviver, tendo desta forma uma maior probabilidade em originar descendentes. Por outro lado, indivíduos com um desempenho inferior têm uma maior dificuldade em sobreviver. Assim, os indivíduos com

melhor desempenho evoluem para se tornarem cada vez mais aptos às necessidades impostas pelo meio.

Num algoritmo genético, cada indivíduo representa uma possível solução para o problema em causa. Todos os indivíduos têm associado uma pontuação (*fitness*) de acordo com a sua aptidão face à solução do problema proposto. Assim, os indivíduos com maior valor de *Fitness* reproduzem-se através do cruzamento com outros indivíduos da população. Os descendentes originados (“filhos”) apresentam algumas características passadas pelos seus (“pais”). Desta forma, uma nova população de soluções possíveis é originada selecionando os melhores indivíduos da geração atual, acasalando-os, produzindo assim um novo conjunto de soluções. Esta nova geração, contém uma maior proporção das características detidas pelos melhores membros da geração anterior, assim sendo, a população irá convergir para a solução ótima do problema [47].

Os algoritmos genéticos são uma técnica robusta para resolver diversos problemas de otimização. Embora não garantam a melhor solução conseguem sempre convergir para uma aceitavelmente boa. De seguida, são explicados os princípios básicos que ocorrem durante a execução de um algoritmo genético binário.

Gene e Cromossoma

Num algoritmo genético binário o gene é o elemento básico do cromossoma, caracterizando assim cada bit do mesmo. Este é responsável pela codificação do cromossoma e pela representação de cada parâmetro da solução, tomando o valor de 1 caso o parâmetro faça parte da mesma ou 0 caso contrário. Tal como acontece nos seres vivos, o gene codifica determinada feição (característica) que pode ser herdada pelas gerações seguintes. No seguimento do contexto anterior, um cromossoma é definido por uma sequência de genes a qual representa uma possível solução para o problema proposto. A cada iteração completa do algoritmo é gerada uma nova população de cromossomas (indivíduos), ou seja, um conjunto de indivíduos candidatos à solução do problema.

Codificação da População Inicial

Para gerar aleatoriamente uma população de n cromossomas, este deve conter de alguma forma informações sobre a solução que representa. Num algoritmo genético binário, cada cromossoma traduz uma sequência de bits, onde cada bit (gene) representa um objeto diferente. O valor associado ao bit, simboliza se este é ou não uma solução.

Cromossoma 1: 11101010

Cromossoma 2: 10110111

A codificação binária fornece inúmeros cromossomas possíveis, mesmo contendo um número reduzido de genes.

Avaliação *Fitness*

A função *fitness* é definida sobre a representação genética, avaliando a qualidade do candidato como solução perante o problema proposto. Por esta razão, a função *fitness* é sempre uma função dependente do problema. É esta função que permite que cada cromossoma possa ser particularmente comparado com todos os outros cromossomas. No entanto, apenas os cromossomas mais aptos são selecionados para se reproduzirem, de forma a produzir uma geração que será ainda mais apta e melhor.

Reprodução e Seleção

Para cada nova geração de cromossomas “filhos”, um par de soluções “pais” é selecionado a partir do conjunto previamente escolhido. A nova solução criada, normalmente partilha muitas características selecionadas dos seus “pais”. Assim, novos “pais” são selecionados para cada novo elemento, continuando este processo até que uma nova população de tamanho adequado seja gerada. As soluções individuais são selecionadas através de um processo baseado na aptidão, onde preferencialmente as melhores soluções são as selecionadas. Também existem outros métodos que apenas classificam uma amostra aleatória da população, embora seja um processo que poderá levar muito tempo.


Crossover

A Tabela 3.1 ilustra o *crossover*, onde são selecionados cromossomas e criados novos descendentes. A forma mais simples é selecionar aleatoriamente um ponto de *crossover*. Tudo o que está antes do ponto de *crossover* é copiado do primeiro pai, e tudo o que vem depois é copiado do segundo pai. O *crossover* pode ser bastante complicado e depende da codificação do cromossoma, a escolha de um ponto específico de *crossover* pode melhorar bastante o desempenho do algoritmo genético. O cromossoma 1 e 2 presente na Tabela 3.1, ilustram o ponto de *crossover*. No cromossoma 1, a castanho, são representados os 4 primeiros genes até ao ponto de *crossover* e a verde os 4 genes após. No cromossoma 2 acontece a situação inversa, a verde encontram-se os 4 primeiros genes e a castanho os 4 últimos. De seguida, são selecionadas as

partes dos dois cromossomas com cores iguais, originado desta forma duas descendências diferentes obtidas a partir do cromossoma 1 e 2.

Tabela 3.1-Crossover.

Cromossoma 1	11101010
Cromossoma 2	10110111
Descendência 1	11100111
Descendência 2	10111010




Mutação

Após o *crossover* existe a probabilidade de ocorrer mutação, de forma a evitar que todas as soluções de uma população possam cair num ótimo local do problema. A mutação em codificação binária, consiste em mudar aleatoriamente o valor de um gene de um determinado cromossoma. A Tabela 3.2 exemplifica a ocorrência de uma mutação nos genes após o *crossover*. O terceiro bit do cromossoma 1 é representado pelo valor 1, no entanto após o crossover e já na descendência 1 esse mesmo bit encontra-se a 0. Analogamente, o segundo bit do cromossoma 2 também origina uma mutação na descendência 2, alterando o seu valor de 0 para 1. Desta forma, este procedimento permite caracterizar a ocorrência de uma mutação num algoritmo genético binário

Tabela 3.2-Mutação após crossover.

Cromossoma 1	11 <u>1</u> 01010
Cromossoma 2	<u>1</u> 0110111
Descendência 1	11 <u>0</u> 00111
Descendência 2	<u>1</u> 1111010



Elitismo

Ao criar uma nova população por *crossover* e mutação, existe uma forte probabilidade de perder o melhor cromossoma. De forma a evitar essa situação, o elitismo garante que o melhor cromossoma é copiado para a nova geração de indivíduos. Portanto, o elitismo permite melhorar rapidamente o desempenho do algoritmo genético, evitando que se perca a melhor solução encontrada.

A Figura 3.1 apresenta um fluxograma representativo de um algoritmo genético.

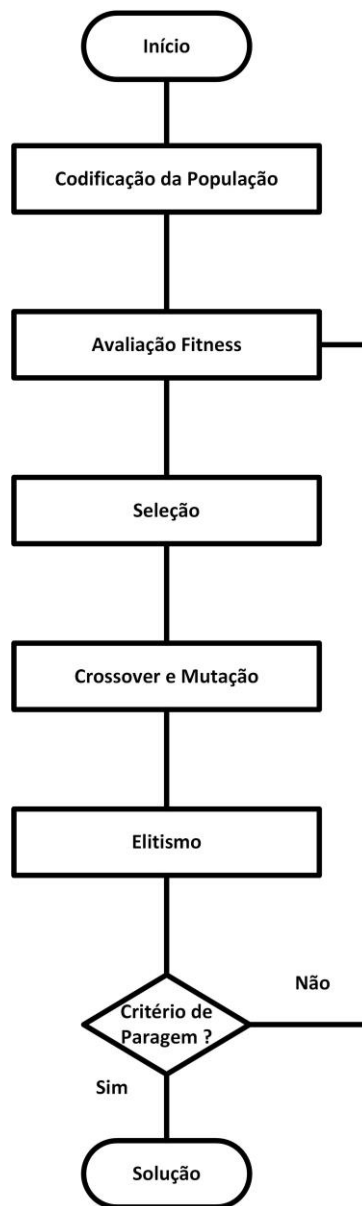


Figura 3.1-Fluxograma de um Algoritmo Genético.

3.2 Metodologia Desenvolvida

Na maioria dos métodos abordados no capítulo 2, é bastante difícil desagregar um conjunto de dispositivos em funcionamento simultâneo. Embora existam métodos capazes de o fazer, são complexos e que exigem elevado poder computacional.

Com o intuito de dar resposta a esta questão, esta tese apresenta um novo método capaz de desagregar diversos dispositivos em funcionamento, baseado na Transformada de *Fourier* do sinal da corrente e num Algoritmo Genético. Visto a Transformada de *Fourier* ser uma operação matemática que identifica as componentes harmónicas presentes num sinal, isto é o seu espectro em frequência, trata-se, como foi visto no capítulo 2 de uma operação importante para caracterizar o comportamento elétrico de cada dispositivo. Assim, neste método cada dispositivo é caracterizado pela sua assinatura elétrica, a qual é extraída pela Transformada de *Fourier* a partir da forma de onda do sinal da corrente.

A Transformada de *Fourier* é uma operação cumulativa, ou seja, a Transformada de *Fourier* de um sinal é igual à soma das várias Transformadas de *Fourier* que formam esse mesmo sinal. Analogamente e de uma forma mais simplificada, a Transformada de *Fourier* de um agregado de dispositivos é composta pelas várias transformadas dos dispositivos desse agregado. Como se pode observar na Figura 3.2, a Transformada de *Fourier* do agregado composto pela tostadeira e pela cafeteira elétrica é formado pela soma individual de cada uma das Transformadas dos dois sinais originais. A diferença de magnitudes presente na harmónica principal obtida no agregado e a soma algébrica das duas assinaturas individuais deve-se ao facto deste gráfico ter sido obtido experimentalmente.

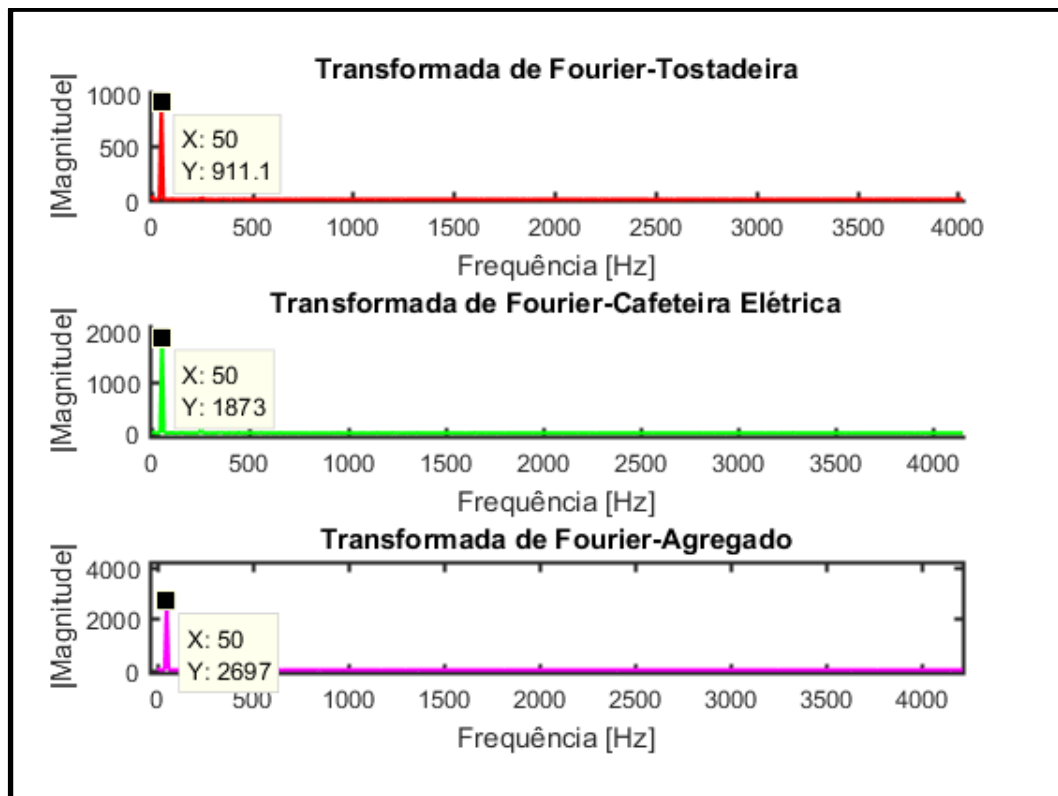


Figura 3.2-Transformada de *Fourier* do agregado de dois dispositivos.

A identificação dos dispositivos, assenta sempre na melhor solução encontrada pelo algoritmo genético. Cada gene da solução encontrada representa um dado dispositivo elétrico. Se o seu valor corresponder a 1 esse dispositivo fará parte da solução do problema, exceto quando ocorre um erro por parte do algoritmo genético. Assim sendo, cada gene representa um dispositivo e cada cromossoma (sequência de bits) dependendo do valor dos seus genes codifica um agregado de dispositivos, garantindo desta forma que não existe nenhum agregado idêntico. Para ilustrar este conceito, apresenta-se na Figura 3.3 um cromossoma exemplificativo de um agregado, onde cada gene representa um dispositivo.

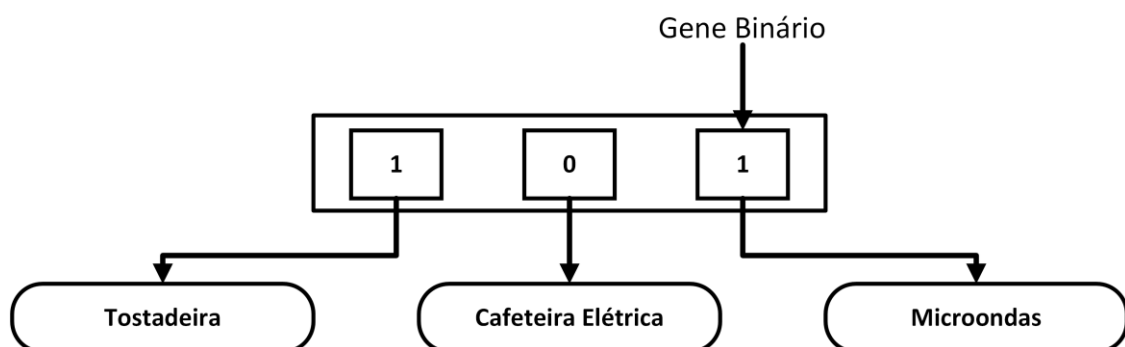


Figura 3.3- Cromossoma binário ilustrativo de um agregado.

Utilizando um cromossoma binário, torna-se possível para a metodologia desenvolvida identificar $2^n - 1$ agregados possíveis, onde n é o número de genes utilizados. Por exemplo, utilizando cromossomas como o da Figura 3.3 com 3 genes (bits) é possível codificar até 7 agregados. Cada cromossoma está diretamente associado a um agregado e caracteriza unicamente um evento, podendo este ser causado por um ou mais dispositivos elétricos. Na Figura 3.3 apenas a tostadeira e o micro-ondas compõem o agregado exemplificado.

De forma a conseguir desagregar vários dispositivos em simultâneo, este método utiliza um algoritmo genético binário com base nos conceitos descritos no subcapítulo 3.1. Após desenvolvimento do método, recorreu-se ao software MATLAB para implementação do algoritmo. A função fitness, responsável por avaliar o desempenho dos indivíduos como solução do problema, é definida com base no erro quadrático entre as Transformadas de *Fourier* estimada e pretendida, tal como se apresenta na equação 3.1.

$$Fitness = |FFT Estimada - FFT Pretendida|^2 \quad (3.1)$$

O fluxograma apresentado na Figura 3.4 representa a metodologia desenvolvida.

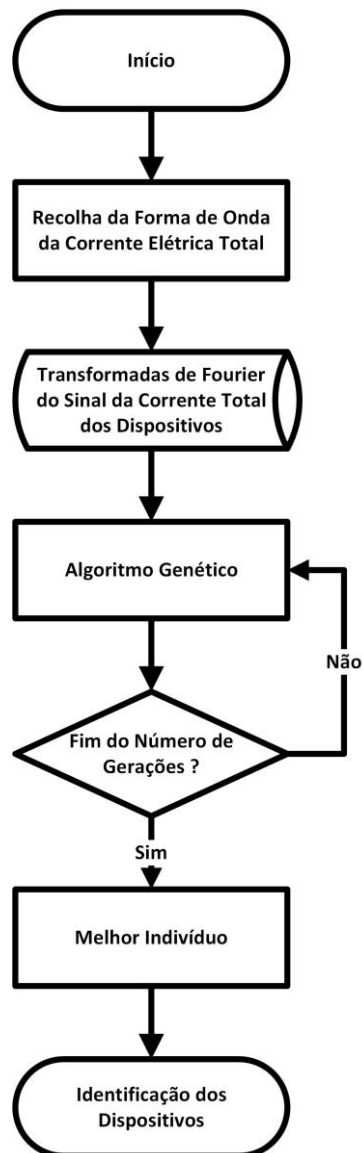


Figura 3.4-Fluxograma do método desenvolvido.

3.3 Testes Experimentais

No presente subcapítulo apresentam-se vários testes experimentais, onde foram considerados vários agregados de dispositivos após uma recolha prévia das formas de onda de cada dispositivo. Nos testes efetuados, utilizaram-se seis dispositivos de diferentes potências e características, desde os puramente resistivos aos que possuem componentes indutivas passando pelos não lineares. Nenhum dos dispositivos utilizados nos testes, altera o modo de funcionamento ou o seu estado durante o processo de identificação. A Tabela 3.3 apresenta os dispositivos escolhidos para efetuar a aferição do método desenvolvido.

Tabela 3.3-Lista de Dispositivos Utilizados nas Experiências.

Nome do Dispositivo	Potência [W]	Carácter
Secador	1600	Indutivo
Micro-ondas	800	Não linear
Tostadeira	700	Resistivo
Ferramenta Elétrica	620	Não linear
Varinha Mágica	200	Não linear
Cafeteira Elétrica	1500	Resistivo

Após a recolha das formas de onda da corrente, por aplicação da Transformada de *Fourier* obtém-se o espectro harmónico de cada um dos vários dispositivos utilizados. Todas as formas de onda foram recolhidas com recurso a um osciloscópio e a uma sonda de corrente. Para conseguir efetuar a leitura dos dados utilizando a sonda de corrente, usou-se uma extensão própria para a efeito apresentada na Figura 3.5.



Figura 3.5-Extensão de ligação para uso com sonda de corrente.

As seguintes figuras ilustram as formas de onda e as respectivas Transformadas de *Fourier* dos seis dispositivos utilizados:

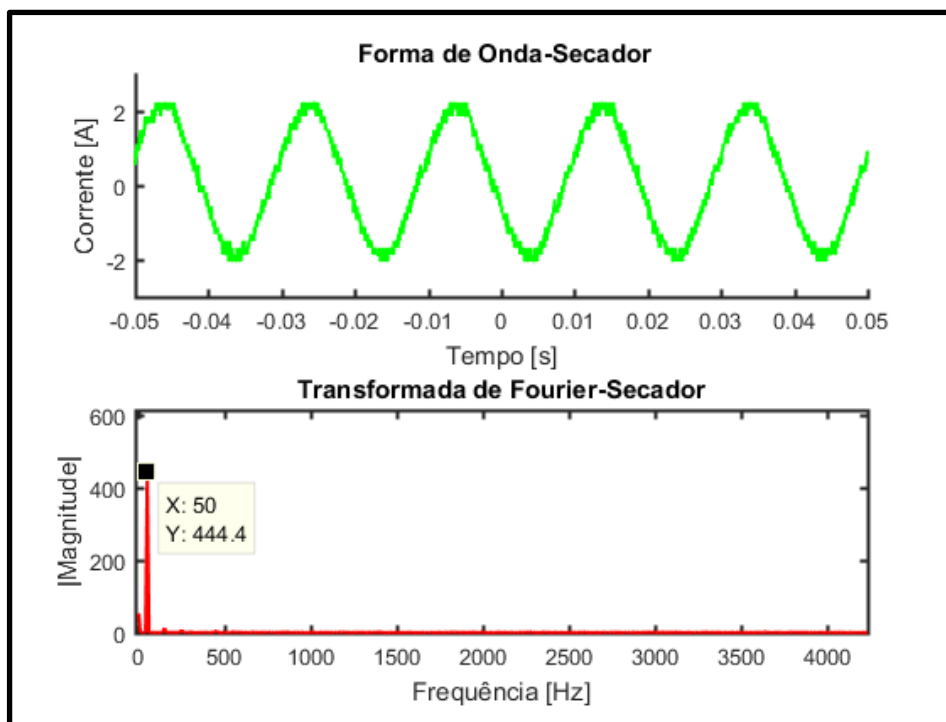


Figura 3.6-Forma de onda e FFT do Secador.

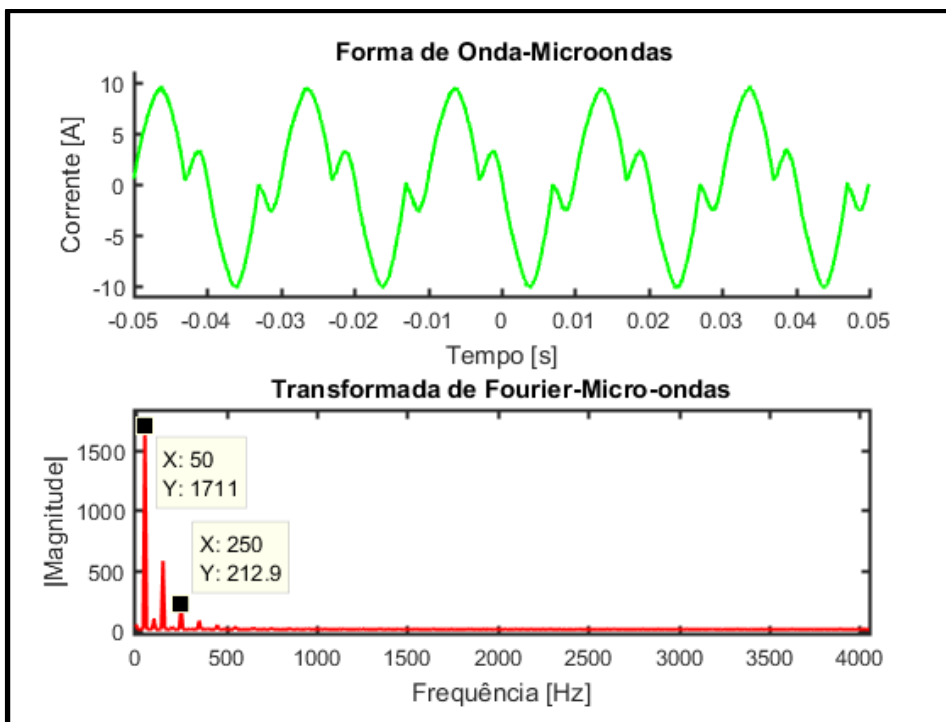


Figura 3.7-Forma de Onda e FFT do Micro-ondas.

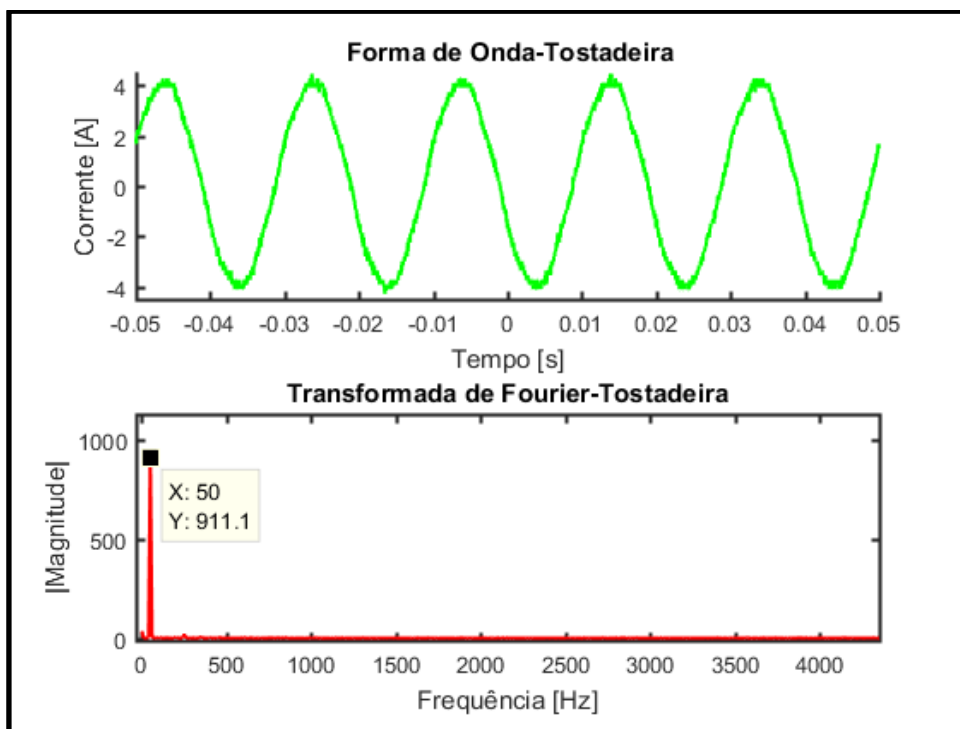


Figura 3.8-Forma de Onda e FFT da Tostadeira.

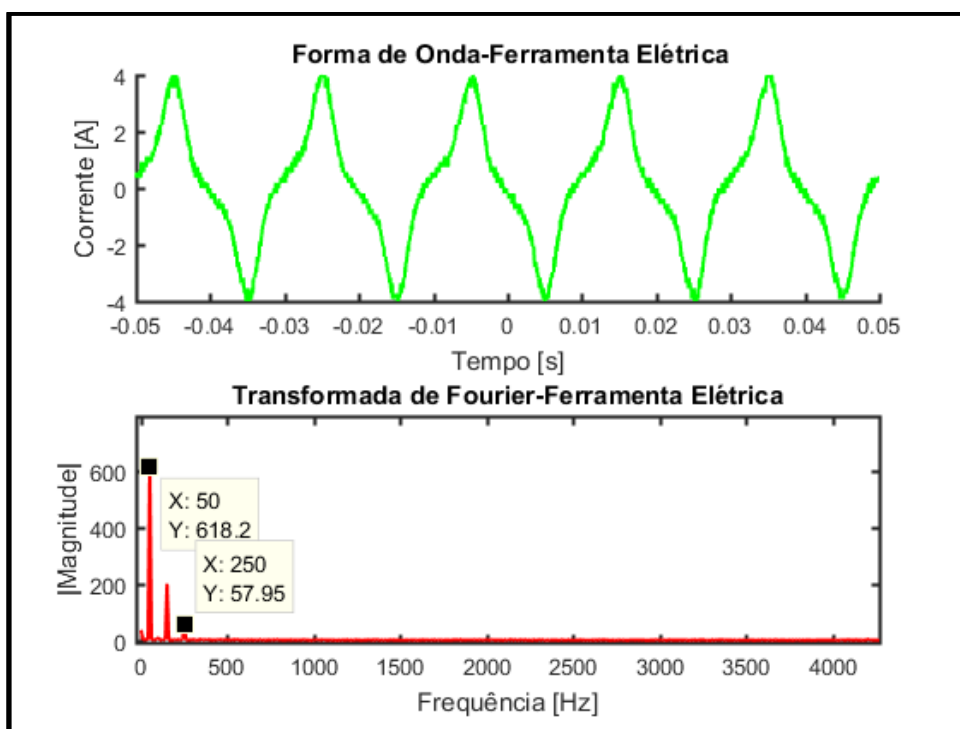


Figura 3.9-Forma de Onda e FFT da Ferramenta Elétrica

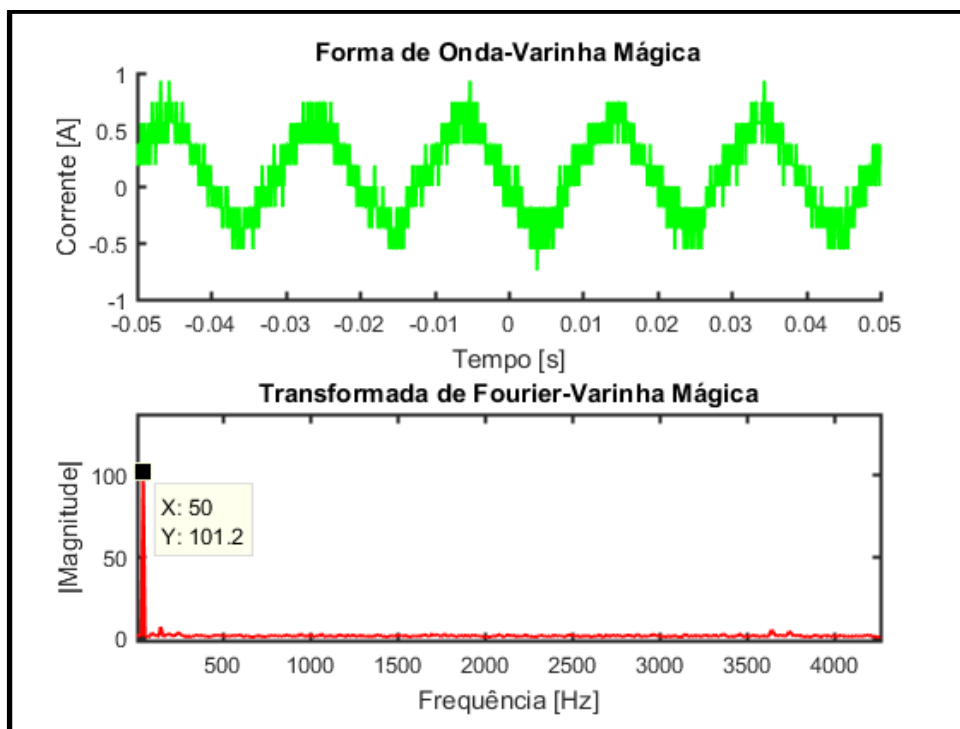


Figura 3.10-Forma de Onda e FFT da Varinha Mágica.

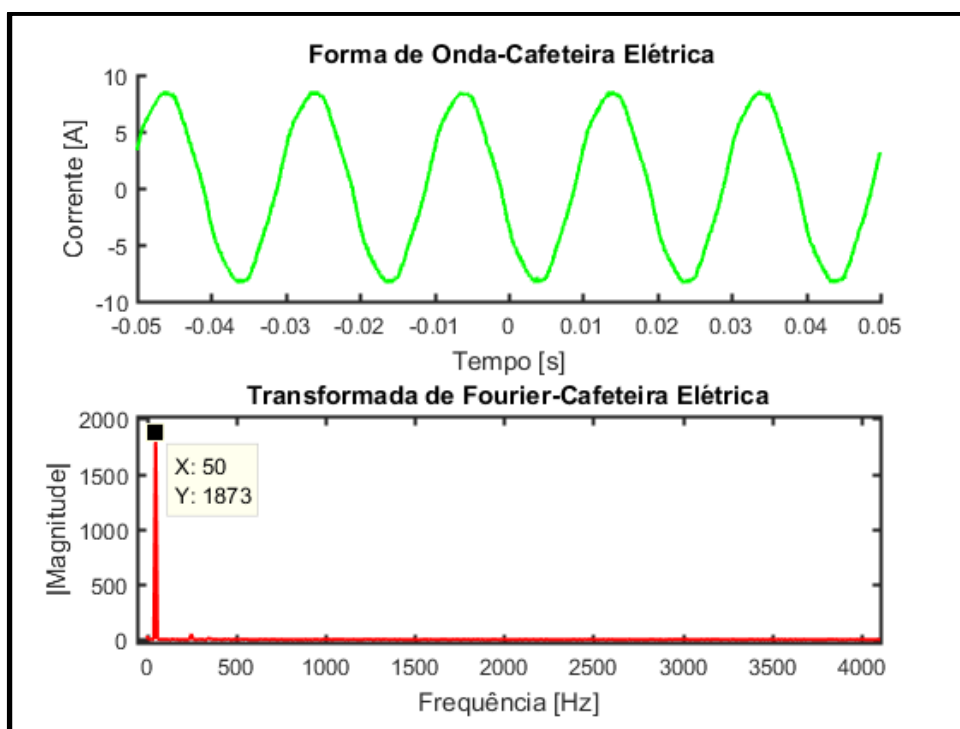


Figura 3.11-Forma de Onda e FFT da Cafeteira Elétrica.

Para compreender melhor os testes experimentais, importa compreender o que é um “agregado de dispositivos”. Tal como o nome indica, um agregado é constituído por diversos dispositivos elétricos, todos eles em funcionamento. Desta forma, o sinal de um agregado é a soma dos sinais individuais de todos os dispositivos que o constituem, pelas razões já descritas no subcapítulo 3.2.

Foram efetuados vários testes com diferentes “agregado de dispositivos”. Para sintetizar a informação, e de forma a tornar mais perceptível os vários testes efetuados a informação apresenta-se na Tabela 3.4 as várias combinações de agregados de dispositivos testadas

Tabela 3.4-Testes efetuados à metodologia desenvolvida para várias combinações de agregado de dispositivos.

	Agregado de Dispositivos Elétricos					
Número do Teste	Cafeteria Elétrica	Micro-ondas	Varinha Mágica	Ferramenta Elétrica	Secador	Tostadeira
1					X	X
2		X			X	
3	X					X
4			X		X	X
5				X	X	
6			X	X	X	
7		X			X	X
8		X		X		X
9		X			X	
10	X				X	X

É de notar que, todos os testes foram efetuados em ambiente controlado, isto é, durante a aquisição das assinaturas elétricas exclusivamente os dispositivos submetidos ao teste se encontravam em funcionamento. Também em nenhum dos testes se utilizou dispositivos com uma potência ativa inferior a 100 W, de forma a evitar erros provocados pelo excesso de ruído presente na rede e pela incerteza associada à escala da sonda de corrente. Por estas razões, este valor de potência é uma limitação imposta ao método desenvolvido, não conseguindo por isso identificar dispositivos de potência inferior.

A Tabela 3.5 apresenta para cada um dos testes efetuados, os dispositivos de cada agregado identificados pelo algoritmo genético. Em cada teste os dispositivos corretamente identificados são referenciados com o símbolo ✓.

Tabela 3.5-Dispositivos Identificados.

	Dispositivos Elétricos Identificados					
Número do Teste	Cafeteria Elétrica	Micro-ondas	Varinha Mágica	Ferramenta Elétrica	Secador	Tostadeira
1					✓	✓
2		✓			✓	
3	✓					✓
4			✓		✓	✓
5				✓	✓	
6			✗	✓	✓	
7		✓			✓	✓
8		✓		✗		✓

	Dispositivos Elétricos Identificados					
Número do Teste	Cafeteria Elétrica	Micro-ondas	Varinha Mágica	Ferramenta Elétrica	Secador	Tostadeira
9		✓			✓	
10	✓				✓	✓

Verifica-se que o método desenvolvido apresenta uma boa eficácia face à complexidade de outros métodos citados no Capítulo 2. Torna-se importante destacar a capacidade do método, perante um agregado de dispositivos, onde a maioria dos métodos já referidos não apresenta nenhuma solução, ou apresenta uma solução bastante complexa. Esta metodologia apresentou nesta situação uma taxa de sucesso de 92 %, identificando corretamente a maioria dos dispositivos presentes nos vários agregados. No decorrer dos testes 6 e 8 verificaram-se a deteção de eventos falsos positivos, onde foram detetados dispositivos que não se encontravam em funcionamento. Tal deve-se ao a pequenas alterações nas assinaturas elétricas, nomeadamente provocadas pelo ruído presente no sensor e flutuações na rede.

4 Implementação do Sistema

Neste capítulo, é apresentada uma solução para o problema descrito no Capítulo 1. De modo a atingir os requisitos inicialmente abordados, nomeadamente o desenvolvimento de um sistema baixo custo e complexidade, propõe-se um protótipo composto por vários módulos. Posto isto, é indicada a uma breve descrição do modelo conceptual, sua implementação e configuração experimental. São ainda abordados detalhadamente todos os pormenores relativamente à forma como os módulos interagem e ainda a arquitetura identificando todos subsistemas.

4.1 Modelo Conceptual

Apresenta-se o conceito que servirá de base para desenvolvimento do MCE, desde a aquisição de dados, até ao seu tratamento e monitorização. São descritos o modelo funcional, modelo arquitetural e o modelo de dados. No modelo funcional são explicadas as funcionalidades do MCE ao dispor do utilizador. O modelo arquitetural apresenta a relação entre os vários blocos do sistema. Por fim, é apresentada a parte da gestão de dados relativamente aos vários dispositivos.

4.1.1 Modelo Funcional

Este sistema é capaz de fornecer informações relativas ao funcionamento dos vários dispositivos elétricos a monitorizar num edifício habitacional ou industrial, através de uma aplicação gráfica para computador, denominada por Interpretador de Eventos (IE). Nesta aplicação os utilizadores têm a possibilidade de consultar detalhadamente todos os eventos ocorridos. São fornecidas informações de consumo de cada dispositivo ou de agregados de dispositivos, através dos seus períodos de funcionamento. Com base no preço da energia, o

utilizador pode consultar custos e quantidade equivalente de CO_2 emitida para a atmosfera devido ao consumo de cada dispositivo (kg CO_2 /Kwh). Também é disponibilizado ao utilizador um diagrama de carga dos eventos ocorridos durante o período temporal analisado, onde é possível consultar a potência associada a cada dispositivo ou conjunto de dispositivos em operação. Todas estas informações utilizadas na construção da aplicação são recolhidas e guardadas em tempo real num cartão SD, presente no Detetor de Eventos (DE), o qual o utilizador deve retirar para poder efetuar a sua leitura do ficheiro com base na aplicação.

Durante todo o processo de recolha de assinaturas, o utilizador deverá apenas ligar o dispositivo que pretende adicionar à base de dados, de forma a evitar a criação de assinaturas elétricas erradas. Todos os dispositivos, para poderem ser identificados pelo sistema necessitam de uma recolha prévia das suas assinaturas. Estas podem ser adicionadas de forma automática ou manual. No utilizador no modo manual o utilizador necessita de criar um vetor de dados com a assinatura elétrica de cada dispositivo a incorporar no código do MCE. Caso seja necessário remover um dispositivo da base de dados o utilizador tem a possibilidade de remover as assinaturas, quer em modo manual quer em modo automático. É importante referir que existem vários dispositivos que apresentam máquinas de estado, pertencentes à categoria II (Ex: Máquina de lavar roupa e de lavar louça) onde, para cada um destes casos, é necessário a recolha de uma assinatura elétrica para cada modo de operação, de forma a evitar erros. Desta forma, o MCE terá mais facilidade em identificar dispositivos da categoria I (Ex: tostadeira), III (Ex: ferramentas elétricas) e IV (Ex: alarmes de incêndio).

De uma forma geral, o sistema implementado permite identificar múltiplos dispositivos em funcionamento onde, com base na aplicação desenvolvida, é possível consultar os horários e custos associados aos dispositivos, durante todos os períodos temporais de funcionamento. É de realçar que o DE é capaz de operar de forma autónoma, isto é, sem a necessidade de nenhuma instrução por parte do utilizador, característica bastante útil por exemplo durante uma auditoria energética.

A Figura 4.1 apresenta a diagrama de uso do MCE, onde é possível observar os dois subsistemas que o constituem, denominados por DE e IE. O utilizador poderá interagir com o MCE através do DE ou do IE. Utilizando o DE é possível iniciar a aprendizagem de novos dispositivos e monitorizar os mesmos. Por outro lado, através do IE o utilizador poderá consultar todas as informações relativamente aos eventos registados.

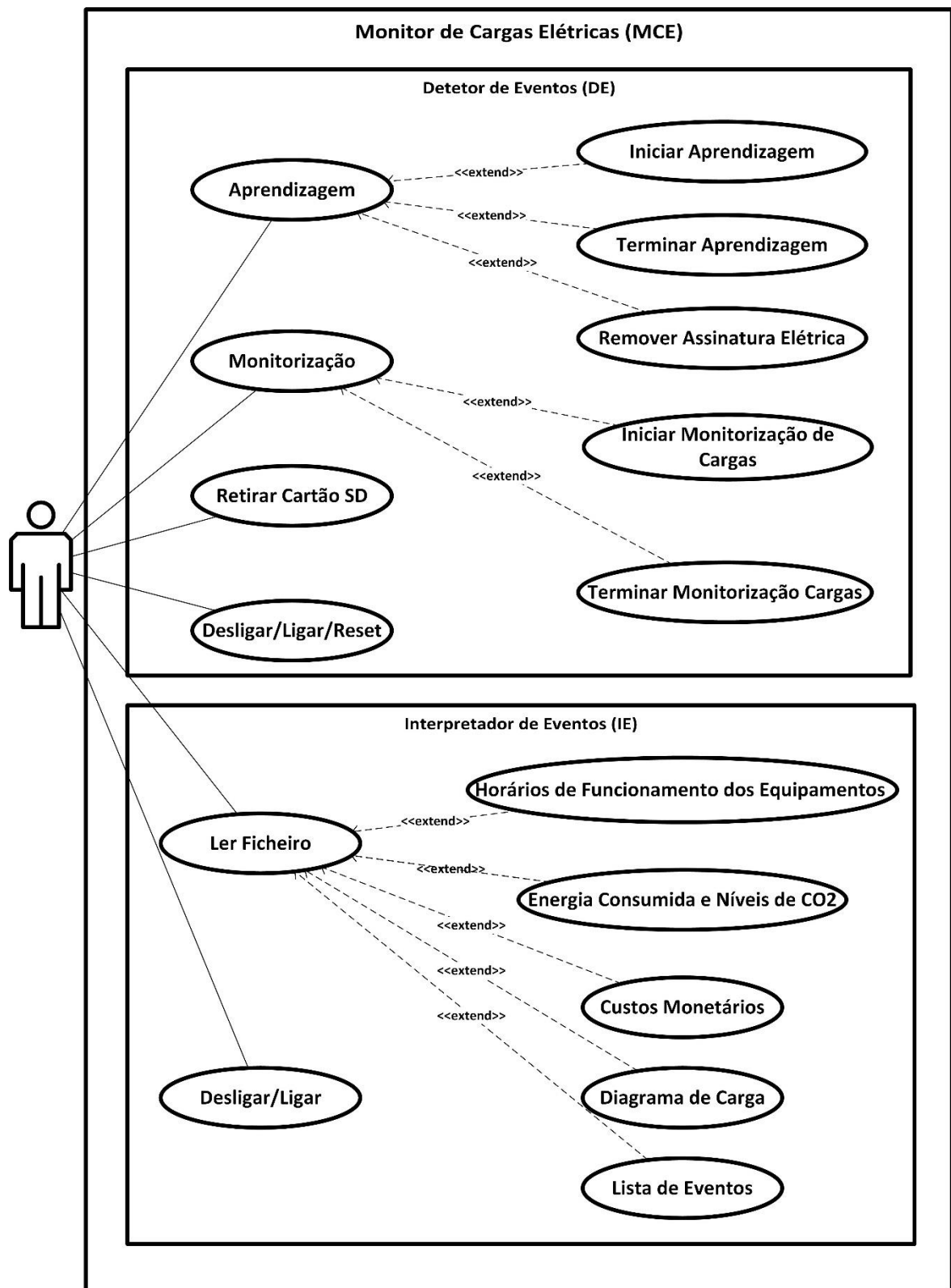


Figura 4.1-Diagrama de Casos de Uso.

4.1.2 Modelo Arquitetural

Nesta secção, é apresentada a arquitetura do MCE, isto é, o Detetor de Eventos em conjunto com o Interpretador de Eventos, bem como a forma como as suas camadas interagem. São apresentadas as camadas de Interface, Monitorização de Cargas e Entidade. A Figura 4.2 apresenta as três camadas que constituem o MCE, sendo explicadas detalhadamente abaixo.

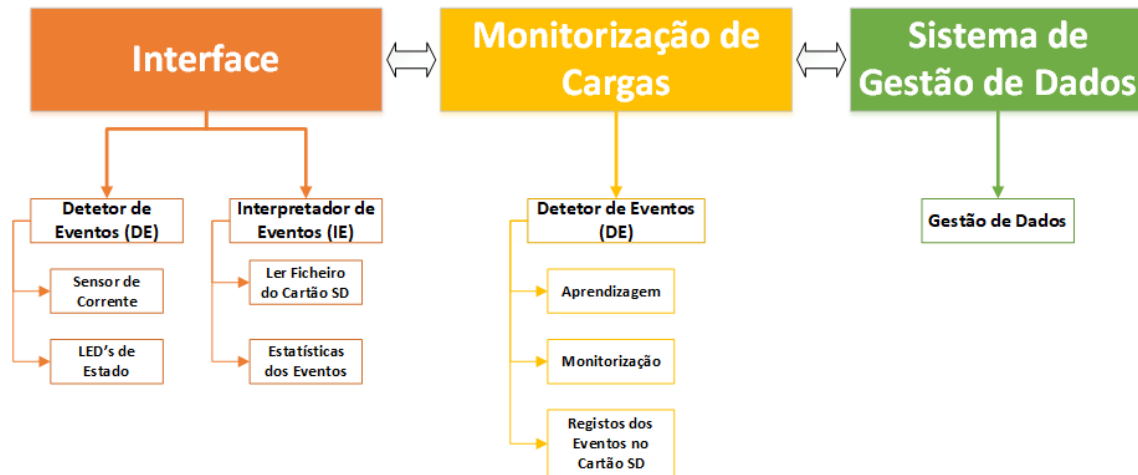


Figura 4.2-Modelo Arquitetural do Sistema.

4.1.2.1 Interface

Esta camada é a mais superficial do MCE, sendo responsável pela interação com o utilizador. É essencialmente composta pelo IE, o qual é responsável pela interpretação dos eventos ocorridos e por todas as funcionalidades do subsistema em causa. O IE contém uma interface gráfica, permitindo ao utilizador visualizar todas as funcionalidades relacionadas com a caracterização dos eventos. A interface gráfica do IE apresenta toda a sua informação de uma forma intuitiva, facilitando assim a interação com o utilizador.

O DE também apresenta uma interface com o utilizador através de dois LED's, um verde e outro azul. O verde indica se o sistema iniciou com sucesso mantendo-se verde caso nenhuma anomalia ocorra, caso contrário este permanecerá desligado. Por outro lado, o azul acende quando é detetada uma variação de potência ativa, superior a 100 W. Para todas as variações de potência inferiores a 100W, o MCE não consegue identificar os dispositivos pelas mesmas razões referidas no subcapítulo 3.3, sendo este o limite do sistema. Por fim, esta camada integra ainda o sensor de corrente, cuja instalação por parte do utilizador.

4.1.2.2 Monitorização

Esta camada é a responsável por monitorizar as cargas, sendo nela identificados os dispositivos em funcionamento, bem como os seus períodos de funcionamento e o calculo da potência associada a cada evento. O algoritmo de desagregação de cargas entra em funcionamento quando é detetada uma variação de potência superior a 100 W, sendo que este responsável pela desagregação correta do dispositivo ou dos dispositivos causadores dos eventos. Todo o processo de desagregação através do algoritmo desenvolvido será explicado detalhadamente no subcapítulo 4.2. Ainda nesta camada é possível adicionar ou remover as assinaturas elétricas dos dispositivos independentemente do modo, manual ou automático. Esta camada interage com a mais superficial onde se encontra o sensor de corrente para a aquisição de dados, assim como com a camada entidade onde utiliza as assinaturas elétricas previamente adquiridas. Por fim, é ainda nesta camada que são efetuados os registos referentes a cada evento, isto é, dispositivos causadores dos mesmos, consumos e horários de funcionamento.

4.1.2.3 Sistema de Gestão de Dados

A camada de gestão de dados, é responsável pelo armazenamento e organização de dados, de forma a responder a todos os objetivos propostos pelo MCE. A Figura 4.3, ilustra o Diagrama de Entidades e Relações constituído por seis entidades e a forma como estas interagem entre si.

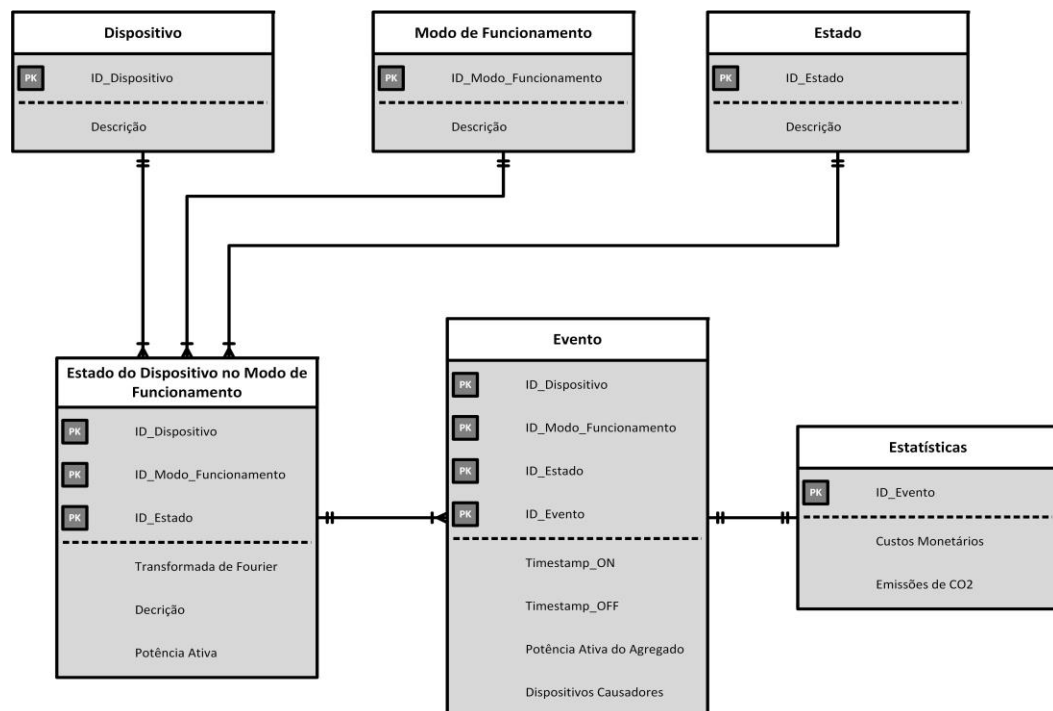


Figura 4.3-Diagrama de Entidades e Relações do MCE.

Para dar resposta ao processo de aprendizagem, torna-se necessário armazenar o comportamento elétrico de cada dispositivo. Cada dispositivo elétrico é caracterizado pela sua assinatura elétrica, sendo esta constituída pelos vários estados que compõe os seus modos de operação (Ex: numa máquina de lavar no modo de centrifugação). As entidades Modo de Funcionamento, Estado e Estado do Dispositivo no Modo de Funcionamento ilustram todos os dados relativos ao comportamento elétrico. A entidade Dispositivo apresenta a descrição dos dispositivos conhecidos pelos MCE, os quais podem conter vários modos de operação. O estado de funcionamento de cada dispositivo, é caracterizado por diferentes valores de potência. A entidade Estado do Dispositivo no Modo de Funcionamento representa as assinaturas elétricas do dispositivo em cada um dos estados de funcionamento, num determinado modo de funcionamento.

A assinatura elétrica de cada dispositivo, é constituída pela Transformada de *Fourier* do sinal da corrente, com as características referidas no capítulo 3. A entidade Estado do Dispositivo no Modo de funcionamento apresenta ainda a potência ativa do dispositivo em cada estado de operação.

A entidade Evento, integra todos os dados que caracterizam um evento, isto é, tempo de início, tempo de fim, potência ativa do agregado e respetivos dispositivos causadores do evento. Por fim, a entidade Estatísticas contém os dados referentes ao custo e às emissões de CO_2 associadas a cada evento.

4.2 Implementação

Neste subcapítulo são abordadas todas as questões relativas à implementação dos princípios do modelo conceptual apresentado no subcapítulo 4.1. É de salientar que a solução proposta para o MCE, apresentado neste documento, apenas integra o modo de aprendizagem manual. São ainda analisadas questões relacionadas com a implementação do DE e do IE.

4.2.1 Tecnologias Utilizadas

Para a implementação do *software* presente no DE, elemento principal do MCE e apresentado neste capítulo recorreu-se à linguagem C++, conseguindo desta forma responder aos objetivos propostos no modelo conceptual.

Para a elaboração do IE recorreu-se ao ambiente de desenvolvimento Eclipse *Neon* programado na linguagem *JAVA*. Optou-se por esta linguagem uma vez que apresenta a capacidade de operar em diversas plataformas e oferece inúmeras ferramentas, proporcionando um ambiente gráfico e facilitando assim a criação da interface com o utilizador. Ao longo de todo o documento recorreu-se ao *software* MATLAB para elaboração dos gráficos experimentais.

4.2.2 Detetor de Eventos

Na secção 4.2.2.1, são explicados detalhadamente todos os procedimentos do algoritmo de desagregação de cargas e aquisição de dados. Na secção 4.2.2.2 são apresentados todos os módulos físicos para a construção do DE.

4.2.2.1 DE-Software

A camada monitorização é a principal do sistema implementado onde, por uma questão de organização de código, foram criadas várias rotinas. Inicialmente são declaradas as variáveis globais e os vetores principais do DE.

Para conseguir capturar corretamente a forma de onda desenvolveu-se, uma rotina responsável por adquirir os dados de corrente a partir da leitura do sensor. Foi escolhida uma frequência de amostragem de 1969,23 Hz, conseguindo assim capturar vários ciclos de onda, num total de 512 amostras. Foram desenvolvidas também mais duas funções auxiliares, uma responsável por enviar para a porta série do Arduino a forma de onda da corrente, e outra por limpar os vetores.

De forma a calcular a Transformada de *Fourier* do sinal da corrente, e visto esta ser a assinatura elétrica escolhida para o sistema, desenvolveu-se uma nova rotina denominada por FFT. A transformada obtida é composta por 256 amostras, calculadas com base na janela deslizante *BlackMan*¹ aplicada ao sinal.

¹ *BlackMan*- Tipo de janela deslizante aplicada ao sinal para a Transformada de *Fourier*, sendo similar às janelas de *Hamming* e *Hann*. Este tipo de janelas obriga os pontos extremos da forma de onda a coincidirem, mantendo a forma de onda continua, sem transições abruptas. Esta condição é essencial para evitar descontinuidades entre o número de períodos final de uma aquisição de sinal e o início da próxima.

A rotina principal é responsável por atribuir as variações de consumo ao dispositivo ou aos dispositivos causadores dos eventos. Nesta rotina é inicializado um algoritmo genético com uma população de 80 indivíduos e com um número de gerações igual a 90. Cada indivíduo é caracterizado por um cromossoma composto por genes binários (ilustrado na Figura 3.3), ou seja, apenas podem tomar o valor 0 ou 1. Todos os indivíduos são inicializados aleatoriamente por um número inteiro. O número de genes está diretamente relacionado com o número de dispositivos a monitorizar. Num universo de 3 dispositivos necessitamos de 3 genes, logo o número máximo em inteiro que a população pode conter é $2^n - 1$, onde n representa o número de dispositivos. Dentro desta rotina é atribuído a cada indivíduo um valor de *fitness*, calculado com base no erro quadrático entre a FFT atual e a FFT estimada. Por questões relacionadas com o aumento da eficiência, esta rotina apenas compara 70 pontos da Transformada de *Fourier*, garantindo sempre a presença das harmónicas principais. Para minimizar o ruído presente no sinal aplicou-se um filtro passa-baixo.

A Figura 4.4 apresenta a rotina relativamente à parte algoritmo genético implementada no DE:

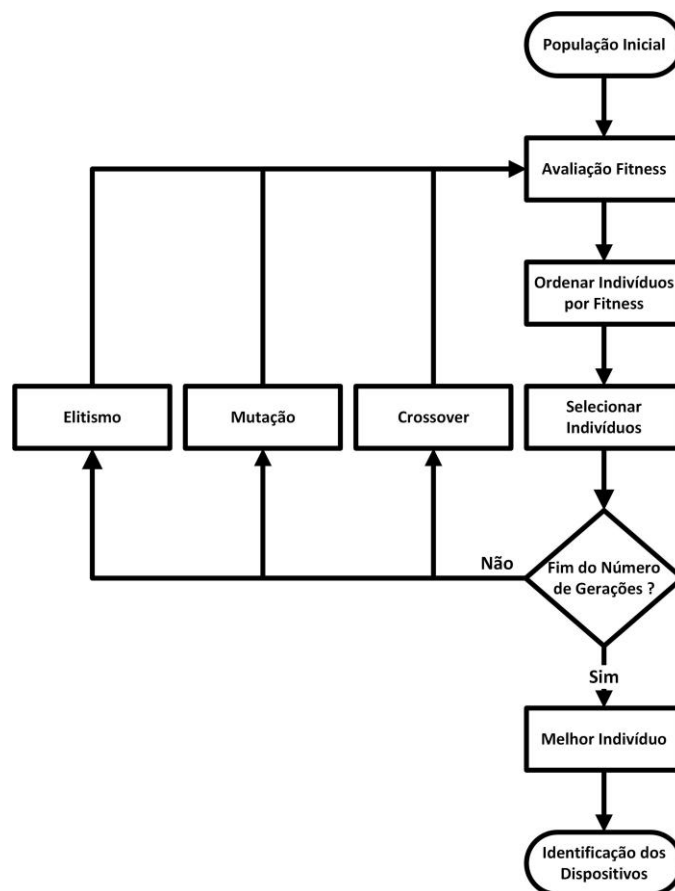


Figura 4.4-Rotina Algoritmo Genético.

Na rotina denominada por monitorização de cargas. É calculada a potência média consumida e é efetuada a verificação da variação de potência, a cada dois segundos. Também aqui, é declarada a função responsável por registar, no cartão SD, um ficheiro texto contendo toda a informação associada aos eventos ocorridos.

A Figura 4.5 ilustra um fluxograma do funcionamento de todo algoritmo implementado no DE:

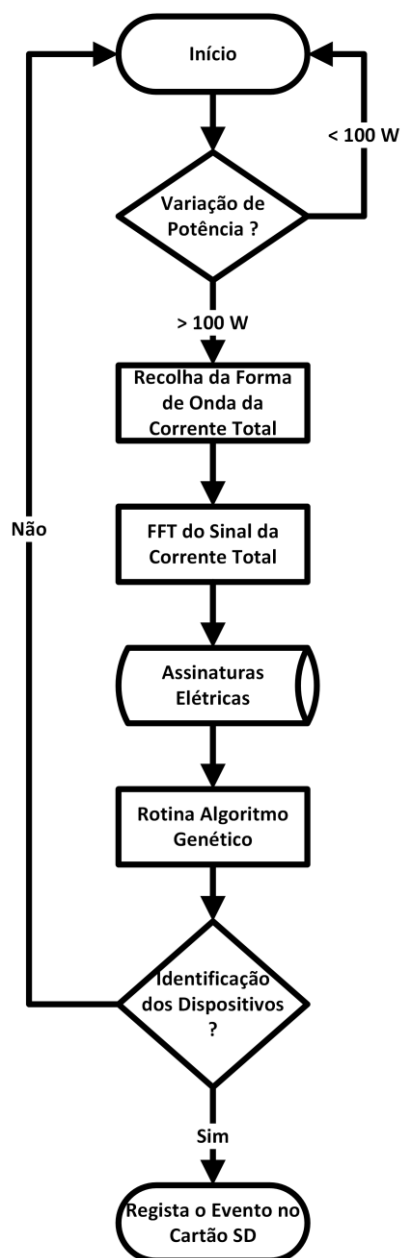


Figura 4.5-Fluxograma representativo do algoritmo presente no DE.

4.2.2.2 DE-Hardware

Neste subcapítulo, é elaborada uma descrição do protótipo ao nível do *hardware* e uma breve explicação sobre a escolha dos componentes utilizados.

Arduino

Para implementação do sistema, e como unidade central de processamento, recorreu-se ao microcontrolador Arduino *Due*, baseado no processador da Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3. Esta placa de arduino é a primeira baseada num microcontrolador de núcleo ARM de 32 bits, possuindo um relógio de 84 MHz e uma tensão de operação de 3.3 V. A placa Arduino *Due* foi a escolhida face à falta de capacidade de processamento presente nas outras placas (ex: Arduino Uno). Outro aspeto positivo, deve-se ao facto da plataforma Arduino ser *Open Source*², permitindo assim que os próprios utilizadores melhorem a interface com os *Shields*³ e sensores utilizados.

A Figura 4.6 ilustra o microcontrolador Arduino utilizado para a implementação do DE:

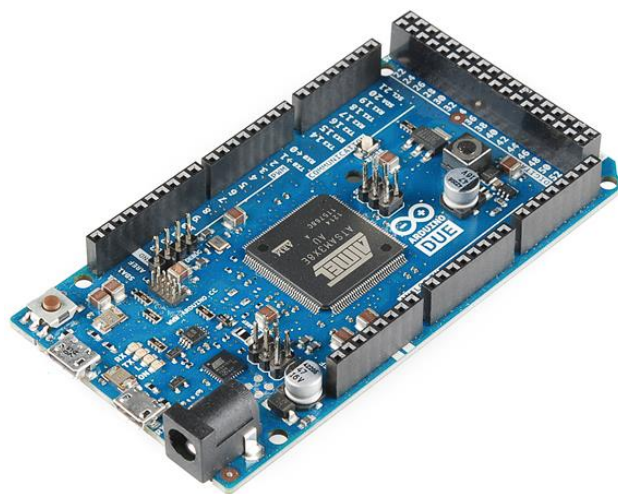


Figura 4.6-Arduino *Due*.

² *Open Source*- É um termo inglês que significa código aberto. Este termo diz respeito ao código-fonte de um *software* que pode ser adaptado para diferentes fins, onde qualquer pessoa pode ter acesso sem restrições.

³ *Shields*-Um *Shield* para Arduino é uma placa de circuito impresso com conectores que encaixam na parte superior da placa do Arduino. A sua função é aumentar as funcionalidades de uma placa de Arduino, existindo para isso diversos *Shields* (Ex: Ethernet, Motor, *Relay* e LCD).

Sensor de Corrente

O sensor de corrente utilizado é o YHDC STC013. É um transdutor de corrente, apresenta uma tensão aos seus terminais em função da corrente que está a medir, com uma escala de 30 A/1V, apresentando ainda uma resistência interna de 62 Ohm e uma razão de transformação de 1800:1.

A Figura 4.7 apresenta o sensor de corrente utilizado no DE:



Figura 4.7-Sensor de Corrente STC013.

No entanto, foi necessário implementar um circuito condicionador de sinal para conseguir efetuar corretamente a leitura dos dados por parte do sensor, pois as portas analógicas do arduino não conseguem ler valores negativos de tensão. Foi necessário implementado um divisor resistivo por forma a centrar a onda no valor de 1.65 V, devido ao VCC do Arduino *Due* apresentar um valor de 3.3 V.

Shield SD

De forma a conseguir armazenar a informação utilizou-se *shield* SD compatível com a placa Arduino *Due*. A Figura 4.8 apresenta o *Shield* SD utilizado:



Figura 4.8-Shield SD compatível com Arduino *Due*.

RTC DS1307

Para conseguir obter a data e hora em que ocorreram os eventos, foi utilizado um relógio de tempo real. O RTC escolhido foi o DS1307, pois este integra a capacidade de comunicar diretamente com o Arduino *Due* através da sua própria biblioteca. Desta forma torna-se possível memorizar a data e hora corretas numa memória não volátil. A Figura 4.9 apresenta o relógio de tempo real utilizado no DE.



Figura 4.9-RTC DS1307.

Detetor de Eventos-Protótipo

Nesta secção é apresentada a versão completa do protótipo do DE apresentado na Figura 4.10. Foi utilizada uma caixa em plástico onde foram integrados todos os componentes acima descritos.



Figura 4.10-Detetor de Eventos-DE.

A Figura 4.11 permite uma visualização perceptível do interior do DE, onde são identificados cada um dos módulos.

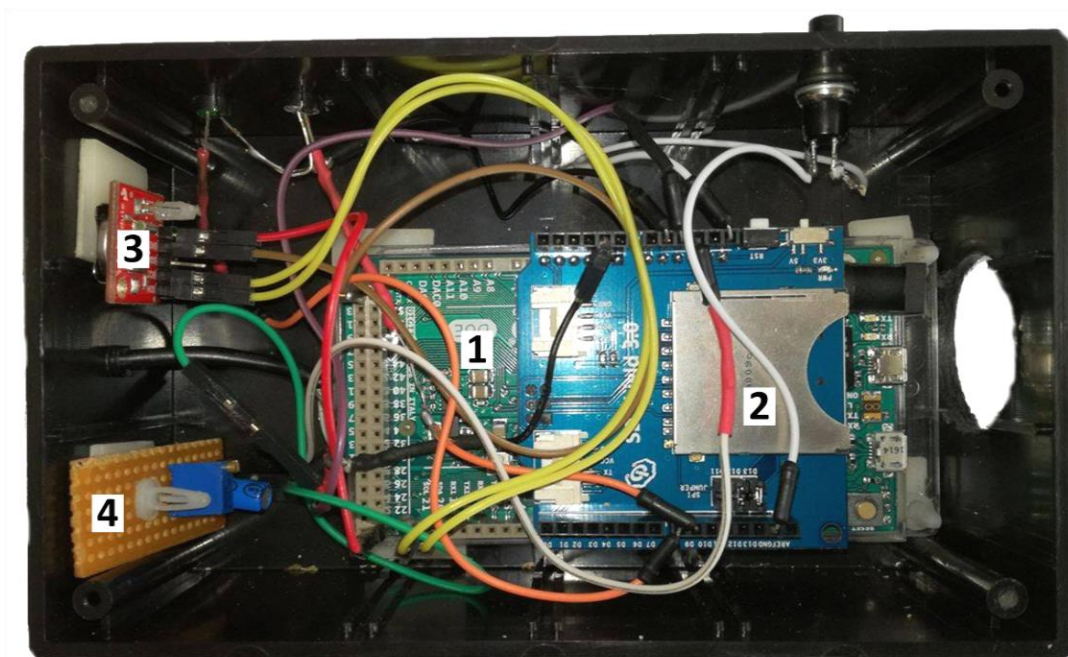


Figura 4.11-Módulos constituintes do DE.

Na Figura 4.11 o número 1 identifica o Arduino *Due*, sendo este o módulo principal do DE. O número 2 identifica o *Shield* SD responsável por efetuar o registo de dados. No lado esquerdo o número 3, identifica o RTC DS1307 utilizado para garantir que todas as datas e horas registadas pelo DE se encontram corretas. O número 4 identifica o divisor de tensão (ajustável), responsável por garantir que as formas de onda adquiridas permanecem centradas em torno de 0 V, para tal o divisor de tensão apresenta uma tensão de saída de 1,65 V.

4.2.3 Interpretador de Eventos

A aplicação constituída por uma interface gráfica, implementada em *Java*, permite ao utilizador extrair toda a informação relativamente aos eventos registados no ficheiro guardado no cartão de memória alocado no DE.

Com o intuito de responder de uma forma simples às funcionalidades propostas, criaram-se quatro classes secundárias e uma classe principal denominada por *Interface.java*. É nesta classe principal que é criado todo o ambiente gráfico do IE. Todas as outras classes secundárias, gerem os dados extraídos do DE para responder às funcionalidades pretendidas. O esquema de classes ilustrado na Figura 4.12 representa as relações entre as classes integradas no IE.

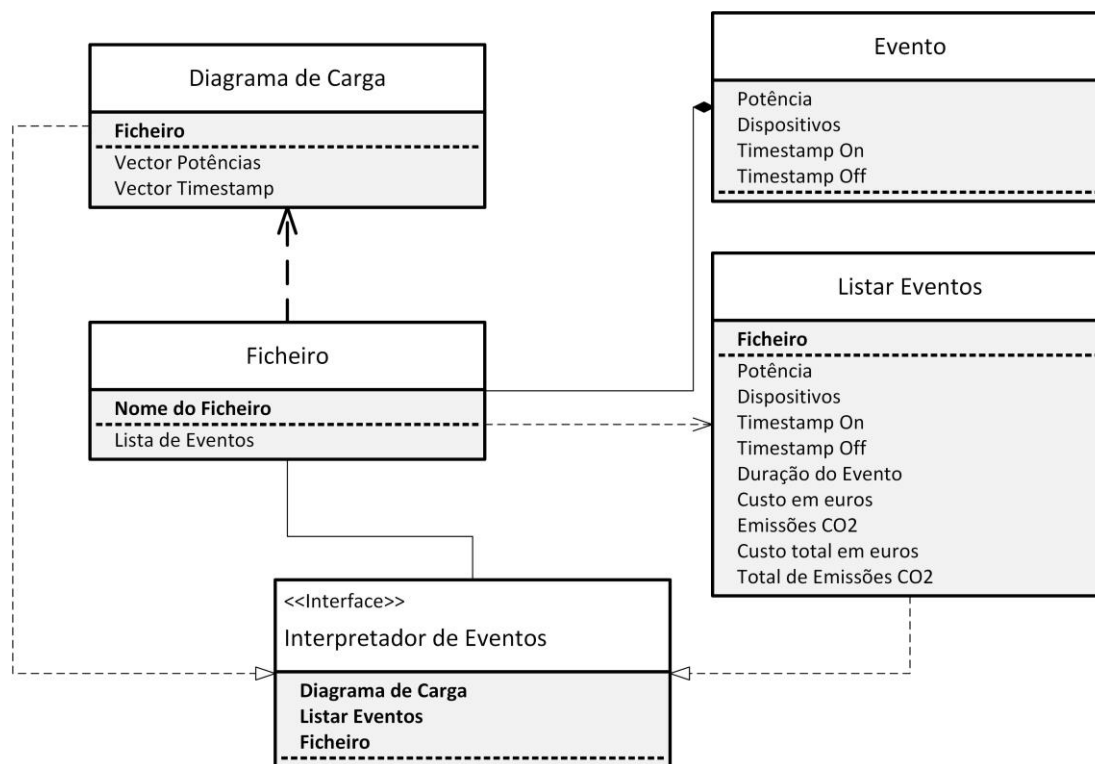


Figura 4.12-Esquema de Relações entre classes do IE.

Como já referido no início deste subcapítulo, o IE implementado apresenta uma interface com o utilizador simples e intuitiva. O ambiente do mesmo apresenta-se na Figura 4.13, onde é possível visualizar as características associadas a cada evento, introduzir a tarifa energética em vigor, consultar o diagrama de carga e ainda os custos totais e emissões de CO_2 . A validação e apresentação dos resultados apresentam-se no subcapítulo 5.2.

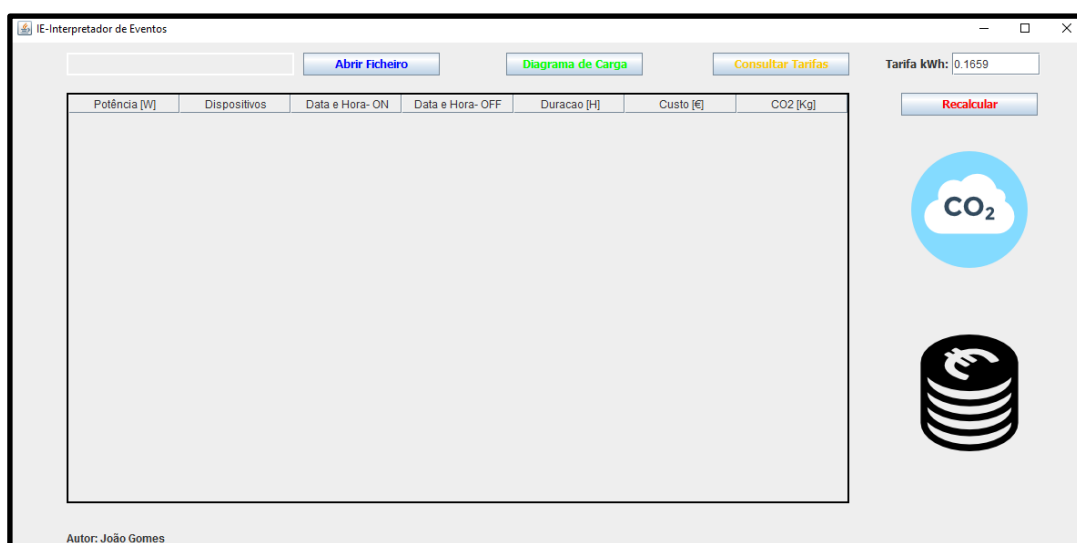


Figura 4.13-Ambiente gráfico do IE.

No IE as emissões de CO_2 são calculadas com base no fator de conversão de eletricidade para emissões de CO_2 (kgCO_2/kWh), apresentando um valor de 0,144 [49]. Os custos são calculados por defeito com preço da tarifa simples (0,1659 EUR/kWh) de baixa tensão para instalações até 6,9 kVA fornecidas pela EDP. No entanto, o IE permite ao utilizador inserir o valor da tarifa que pretender.

4.3 Instalação Experimental-Detetor de Eventos

A Figura 4.14, representa a configuração experimental do DE onde estão os seguintes elementos:

- ✓ Sensor de Corrente não intrusivo 30 A/1V (STC013).
 - Corrente de Entrada: 0-30 A.
 - Tensão de Saída: 0-1 V.
 - Resistência Interna: 62 Ohm.
 - Razão de Transformação: 1800:1
- ✓ Detetor de Eventos.

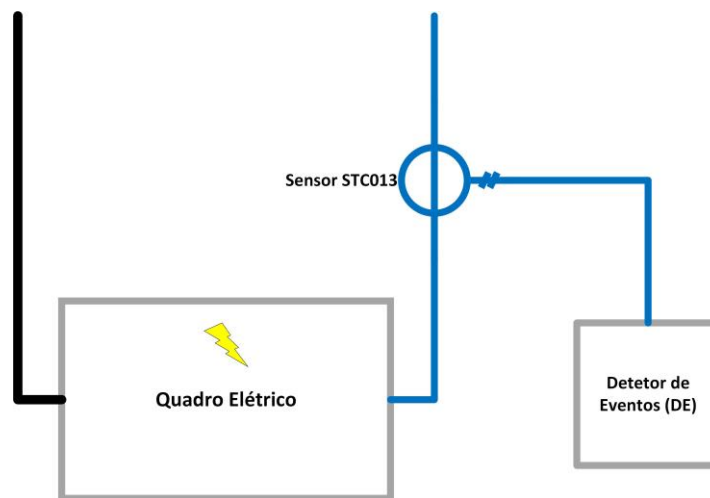


Figura 4.14-Configuração Experimental do DE

A Figura 4.14 apresenta a configuração experimental do sistema. O sensor de corrente encontra-se conectado ao DE, sendo este o responsável por todas as questões de aquisição e tratamento de dados. O DE apresenta uma resolução de 10 bits e uma frequência de amostragem de 1929,23 Hz, correspondendo a um período de amostragem aproximado de 500

microssegundos. Este apresenta ainda, uma saída para conexão via USB com o computador e uma entrada de alimentação capaz de operar entre 7 a 12 Volt.

A Figura 4.15 ilustra a montagem experimental em ambiente real. Nesta instalação é possível visualizar o DE e o sensor de corrente não intrusivo num ambiente real.



Figura 4.15-Montagem Experimental do DE numa situação real.

5 Validação e Resultados Experimentais

Neste capítulo vão ser apresentados os resultados de validação do MCE analisando cada um dos seus módulos integrantes do sistema, ou seja, o DE e o IE. Para avaliar o MCE e para a elaboração da análise de resultados, optou-se por considerar como cenário base o apresentado no subcapítulo 4.2. Inicialmente será feita a validação do DE seguido a validação do IE.

5.1 Detetor de Eventos

Instanciando o DE implementado no subcapítulo 4.2.2, apresentam-se ao longo deste subcapítulo as assinaturas elétricas recolhidas dos dispositivos utilizados para a validação de resultados. Todas as assinaturas elétricas foram recolhidas de forma manual, não efetuando o processo de aprendizagem referido no modelo conceptual descrito no subcapítulo 4.1. Para aquisição das formas de onda e para o cálculo da Transformada de *Fourier*, utilizou-se a frequência de amostragem referida anteriormente.

Como dispositivos elétricos, utilizaram-se dispositivos que não variam a sua forma de onda ao longo do tempo dentro do seu modo de funcionamento. Escolheram-se dispositivos com carácter puramente resistivo, com características indutivas e com características não lineares. Avaliando estes tipos de dispositivos, torna-se evidente a sua diferença relativamente ao conteúdo harmónico. A Transformada de *Fourier* de um dispositivo puramente resistivo, apenas apresenta uma harmónica à frequência fundamental de 50 Hz. Por outro lado, um dispositivo com características não lineares apresenta conteúdo harmónico em múltiplos da sua frequência fundamental, distinguindo-se assim dos restantes dispositivos.

Tabela 5.1-Tabela de Dispositivos Utilizados nos Testes.

Nome do Dispositivo	Potência [W]	Carácter
Micro-ondas	800	Não linear
Tostadeira	700	Resistivo
Ferramenta Elétrica	500	Não linear
Holofote	500	Resistivo
Cafeteira Elétrica	1500	Resistivo

As Figuras Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3, Figura 5.4 e Figura 5.5 ilustram a forma de onda de cada dispositivo elétrico utilizado, bem como a respetiva assinatura elétrica. Como já referido a assinatura é composta pela Transformada de *Fourier* do sinal da corrente, podendo esta caracterizar um dispositivo ou o modo de funcionamento, caso este possua vários modos de operação. Todas as assinaturas elétricas presentes neste subcapítulo, são obtidas com base no DE do MCE.

De forma a aumentar a eficiência do DE, adicionou-se à assinatura elétrica uma média das 3 primeiras harmónicas ímpares de cada dispositivo para a obtenção dos resultados experimentais. Com a introdução desta característica na assinatura elétrica, foi possível uma melhoria significativa na eficácia do método com agregados compostos por mais de 2 dispositivos.

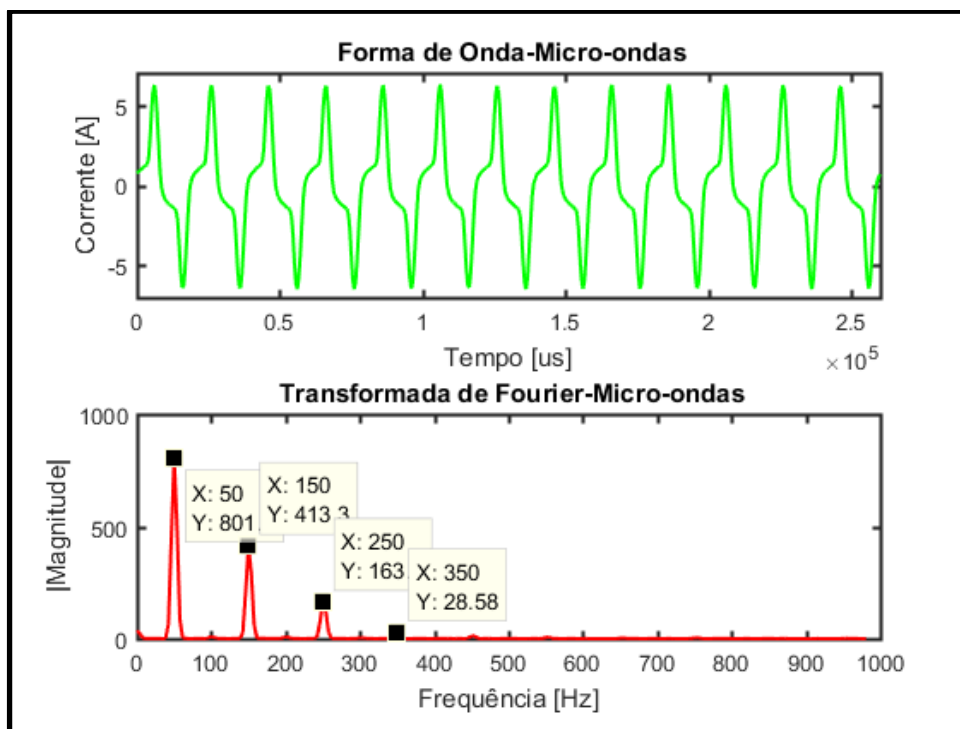


Figura 5.1-Forma de Onda e Transformada de *Fourier* do Micro-ondas.

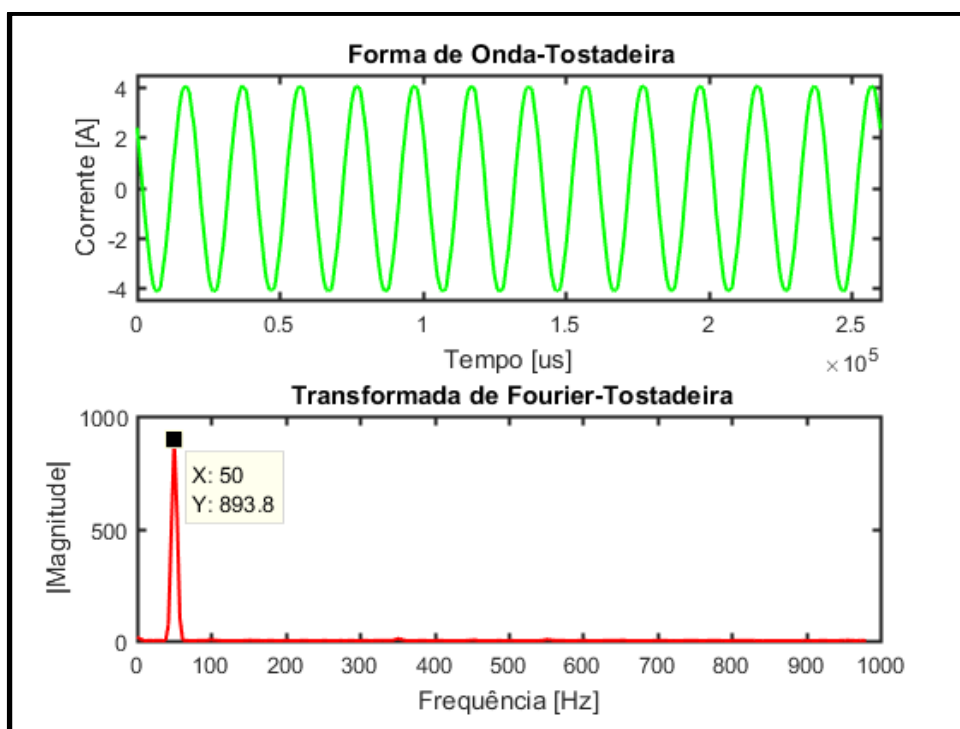


Figura 5.2-Forma de Onda e Transformada de *Fourier* da Tostadeira.

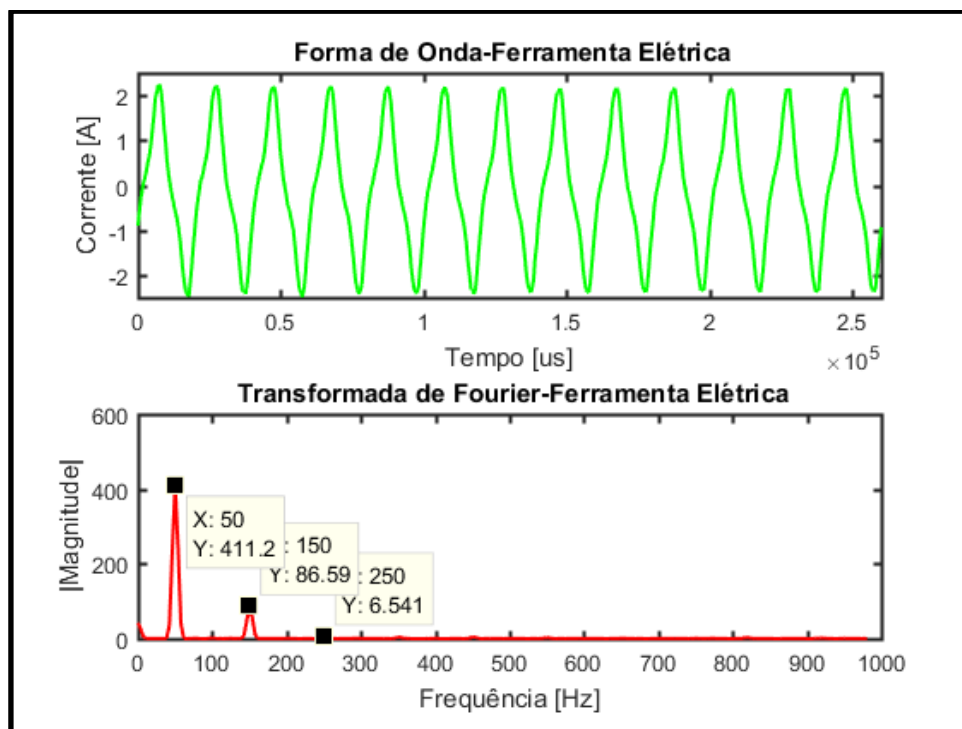


Figura 5.3-Forma de Onda da Ferramenta Elétrica e Transformada de *Fourier*.

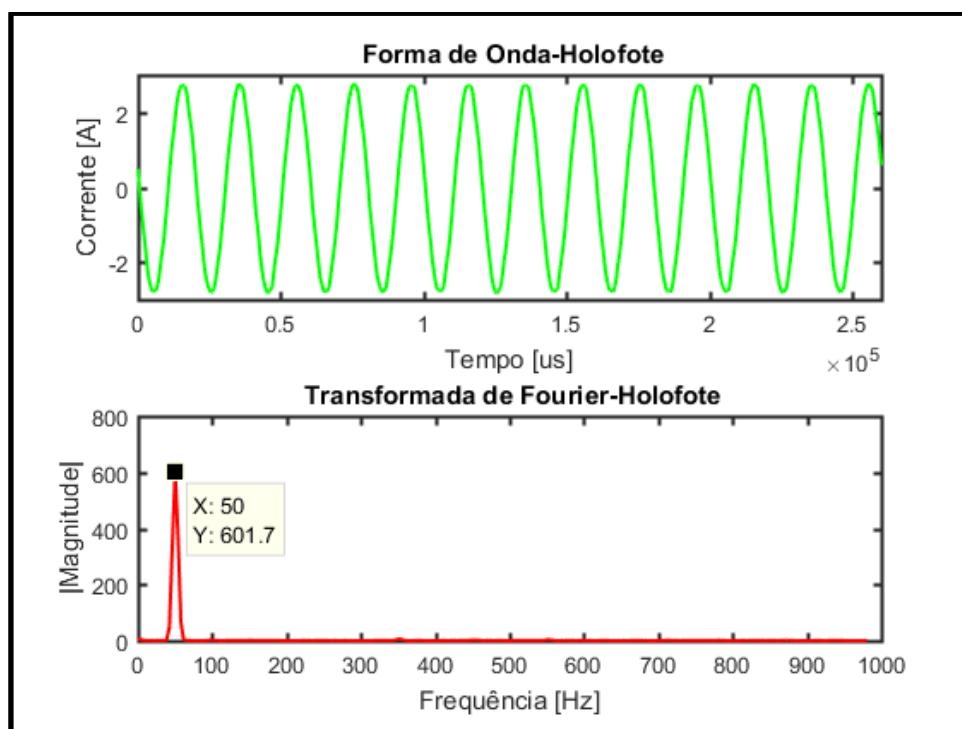


Figura 5.4-Forma de Onda e Transformada de *Fourier* do Holofote.

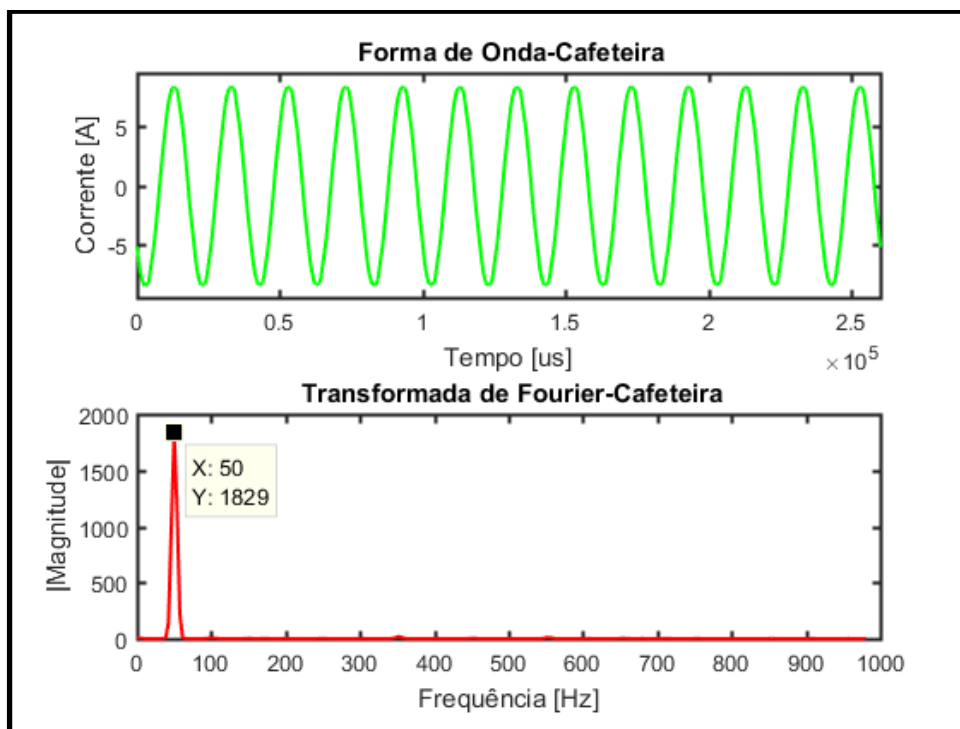


Figura 5.5-Forma de Onda e Transformada de *Fourier* da Cafeteira Elétrica.

A Figura 5.6 apresenta o ruído presente na rede captado pelo sensor quando nenhum dispositivo elétrico se encontra em operação. Este ruído presente em todas as leituras efetuadas pelo DE, interfere nas assinaturas elétricas. Devido a este ruído, e às flutuações de tensão na rede, as assinaturas elétricas apresentam ligeiras alterações de leitura para leitura para o mesmo dispositivo. O *offset* presente na figura deve-se a pequenas variações de tensão presentes nos terminais do sensor de corrente, isto é, para que a onda se encontre centrada em 0 V o divisor de tensão (identificado na Figura 4.11 pelo número 4) deve apresentar exatamente 1,65 V. Caso este não esteja corretamente centrado acontece o cenário presente na Figura 5.6.

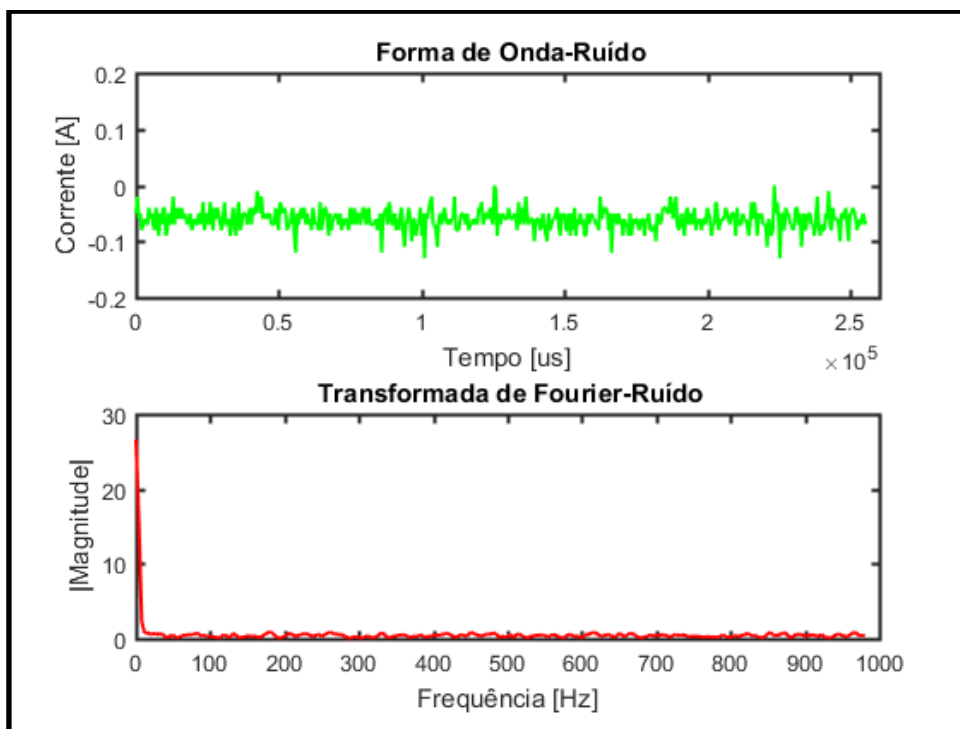


Figura 5.6-Ruído e Transformada de *Fourier* presente no sinal da corrente.

Após a aquisição das várias assinaturas elétricas acima apresentadas, foram gerados vários eventos, apresentando um agregado de dispositivos em funcionamento ou apenas um único dispositivo.

Como cenário de teste, instalou-se o DE num circuito elétrico principal (Figura 4.15) de uma habitação residencial que não continha qualquer outro dispositivo ligado, garantindo que apenas os dispositivos escolhidos são operados. Seguem-se abaixo os três estudos efetuados, o estudo 1, 2 e o 3, onde o agregado máximo em cada estudo é composto por 3, 4 e 5 dispositivos respetivamente. Cada estudo apresentado é constituído por uma lista composta por vários testes.

Em cada um dos testes é apresentado o agregado real e o identificado pelo DE. Importa ainda referir que um evento é caracterizado por uma variação de potência de um valor aproximadamente constante para outro, pela sua duração e dispositivos responsáveis. Assim sendo, os dispositivos identificados com sucesso nos testes experimentais encontram-se assinalados nas tabelas pelo símbolo ✓. A tabela seguinte apresenta a sequência de eventos criados para testar o DE do MCE com três dispositivos, formando um total de 7 agregados.

Tabela 5.2-Resultados experimentais com 3 Dispositivos (Estudo 1).

Teste	Agregado	Dispositivos		
		Cafeteira Elétrica	Holofote	Tostadeira
1	Real	X		
	Identificado	✓		
2	Real		X	
	Identificado		✓	
3	Real			X
	Identificado			✓
4	Real	X		X
	Identificado	✓		✓
5	Real	X	X	
	Identificado	✓	✓	
6	Real		X	X
	Identificado		✓	✓
7	Real	X	X	X
	Identificado	✓	✓	✓

Analisando a Tabela 5.2, verifica-se que o DE com os 3 dispositivos considerados consegue detetar com sucesso todas as combinações possíveis. Todos os dispositivos são dispositivos puramente resistivos, sendo importante realçar a dificuldade em desagregar dois dispositivos resistivos, quando estes têm uma potência conjunta muito próxima de um outro dispositivo. Por exemplo, no teste 6 potência de agregado é de 1200 W e a potência da cafeteira elétrica é de 1500 W, podendo originar a deteção de um falso evento, tal como referido em alguns dos métodos referenciados no capítulo 2.

Após o anterior teste experimental com três dispositivos, introduziu-se um novo dispositivo desta vez com um maior conteúdo harmónico. Foi adicionada a ferramenta que possui uma potência de 500 W e as primeiras três harmónicas ímpares (3ª harmónica pouco significativa), tal como ilustra a Figura 5.3. Com a introdução deste novo dispositivo existem 16 agregados possíveis, sendo apenas apresentados 10 na Tabela 5.3.

Tabela 5.3-Resultados experimentais com 4 Dispositivos (Estudo 2).

Teste	Agregado	Dispositivos			
		Cafeteira Elétrica	Holofote	Tostadeira	Ferramenta
1	Real	X			
	Identificado	✓			
2	Real			X	
	Identificado			✓	
3	Real		X		
	Identificado		✓		
4	Real				X
	Identificado				✓
5	Real			X	X
	Identificado			✓	✓
6	Real		X		X
	Identificado		✓		✓
7	Real		X	X	X
	Identificado		✓	✓	✓
8	Real	X			X
	Identificado	✓			✓
9	Real	X	X	X	
	Identificado	✓	✓	✓	
10	Real	X	X	X	X
	Identificado	✓	✓	✓	✓

Observa-se que, para todos estes testes, o agregado identificado é idêntico ao agregado considerado (real). A introdução de um dispositivo com conteúdo harmónico na corrente, demonstra a capacidade e eficácia do método também para identificar dispositivos não lineares (categoria III). O facto da ferramenta eléctrica apresentar harmónicas faz com que esta seja diferenciada com sucesso do holofote, mesmo que ambos os dispositivos eléctricos apresentem uma potência 500 W. As diferenças entre as suas Transformadas de *Fourier* do sinal da corrente, podem ser analisadas nas Figura 5.4 e Figura 5.3.

Na Figura 5.7 apresenta-se a forma de onda e a respetiva assinatura eléctrica obtidas para o agregado do teste 10 presente na Tabela 5.3.

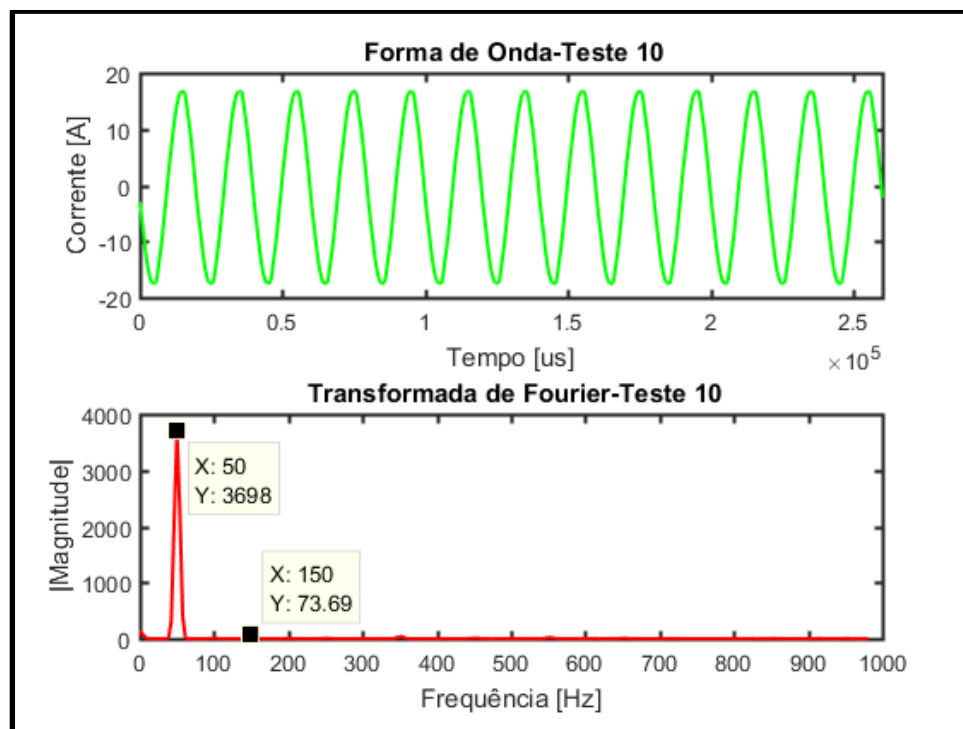


Figura 5.7-Agregado composto por 4 Dispositivos, teste 10.

Tendo em conta as Figura 5.2, Figura 5.3, Figura 5.4 e Figura 5.5, e comparando-as com a Figura 5.7, observa-se que o espectro em frequência do agregado apresenta um valor que é a soma de todas as harmónicas do espectro individual de cada dispositivo, tal como já referido no subcapítulo 3.2. A terceira e quinta harmónicas do agregado apresentam uma reduzida magnitude, face à magnitude da harmónica principal, pois o agregado é maioritariamente constituído por dispositivos resistivos, contendo por isso uma forte componente harmónica centrada na frequência de 50 Hz.

Como último cenário de teste adicionou-se o micro-ondas, tendo este também elevado conteúdo harmónico. Todos os dispositivos dos testes anteriores foram mantidos, tentando desta forma abranger um vasto leque de dispositivos. Com a introdução deste novo dispositivo, o DE está exposto a um maior número de combinações. A tabela seguinte apresenta uma 10 dos 32 agregados possíveis nesta situação.

Tabela 5.4-Resultados experimentais com 5 Dispositivos (Estudo 3).

Teste	Agregado	Dispositivos				
		Cafeteira Elétrica	Holofote	Tostadeira	Ferramenta	Micro-ondas
1	Real					X
	Identificado					✓
2	Real				X	
	Identificado				✓	
3	Real				X	X
	Identificado				✓	✓
4	Real			X	X	
	Identificado			✓	✓	
5	Real		X		X	X
	Identificado		✓	✗	✓	
6	Real	X		X	X	X
	Identificado	✓		✓	✓	✓
7	Real	X		X		X
	Identificado	✓		✓	✗	
8	Real		X			X
	Identificado		✓			✓
9	Real	X	X	X	X	
	Identificado	✓	✓	✓	✓	
10	Real	X	X	X	X	X
	Identificado	✓	✓	✓	✓	✓

Avaliando os resultados obtidos na Tabela 5.4, verifica-se que à medida que aumentamos o número de agregados possíveis, de 16 combinações para 32 combinações, surge a detecção de falsos eventos. Os testes 5 e 7 são exemplos da detecção de eventos falsos positivos, nomeadamente provocados pela ocorrência de variações das assinaturas elétricas e também pela convergência do próprio algoritmo de desagregação. Por exemplo, no teste 5 o DE deteta outro dispositivo em vez do micro-ondas. Esta situação, é provocada pelas pequenas variações da assinatura elétrica do micro-ondas, devido ao facto deste dispositivo não emitir radiação micro-ondas de uma forma constante. Na Figura 5.8 apresentam-se as diferenças entre a assinatura real e a assinatura estimada para o teste 5.

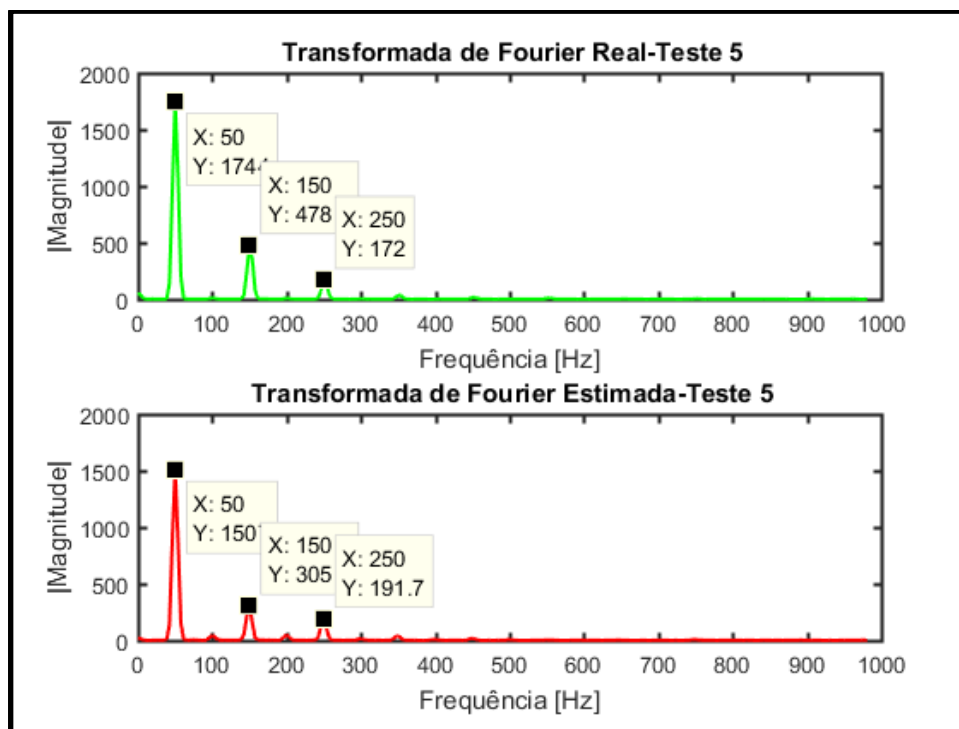


Figura 5.8-Comparação entre a assinatura real e estimada para o teste 5.

São visíveis as diferenças entre as magnitudes das harmônicas, o que leva algoritmo a convergir para uma solução não correta. À medida que se aumentam o número de dispositivos que constituem os agregados, o número de mínimos locais também aumenta, isto é, surgem falsos eventos como possíveis soluções evitando assim que o método (algoritmo genético) encontre o mínimo global, ou seja, a solução correta.

Pode concluir-se que o método desenvolvido para a desagregação de cargas é eficiente, mas apenas quando as assinaturas elétricas não variam face às já conhecidas pelo DE ou a assinatura de um agregado composto por vários dispositivos é igual à de um outro único dispositivo.

5.2 Interpretador de Eventos

Recorrendo aos dados armazenados no cartão de memória presente do DE, e através do IE, torna-se possível analisar qual ou quais os dispositivos em operação ao longo de todo o período de monitorização. Para cada evento é identificada a sua duração, tempo de início e de fim, custo e emissões de CO_2 associados. Ao longo deste subcapítulo, são apresentadas as estatísticas correspondentes aos agregados dos estudos experimentais efetuados no DE com 3, 4 e 5 dispositivos descritos nas Tabela 5.2, Tabela 5.3 e Tabela 5.4, respetivamente.

A Figura 5.9 apresenta o ambiente proporcionado, pelo IE ao utilizador, perante os testes efetuados para o estudo 1.

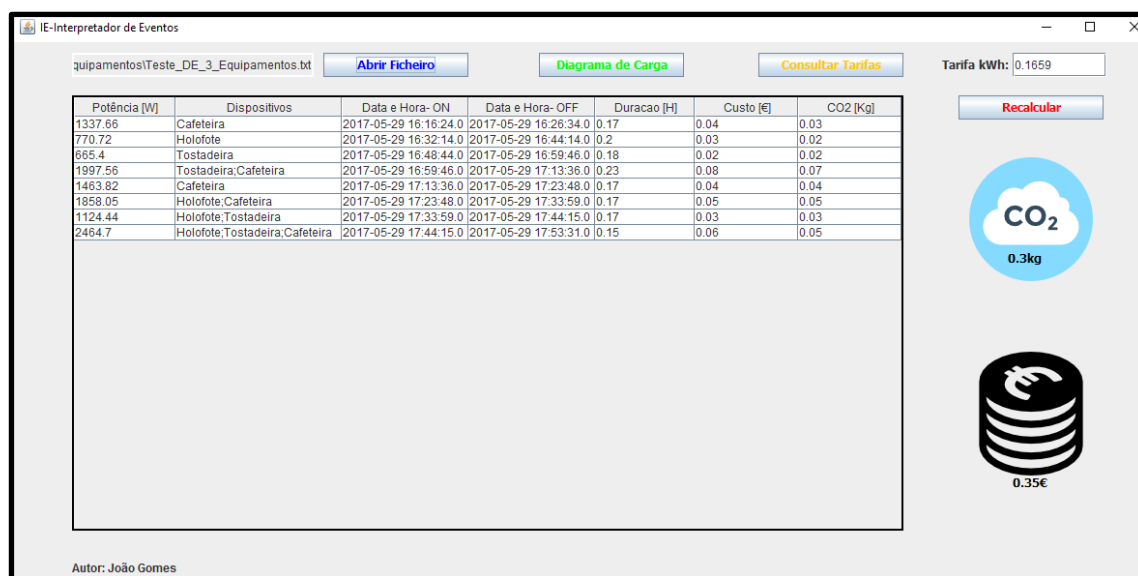


Figura 5.9-Eventos interpretados pelo IE a partir dos eventos registados no estudo 1 pelo DE, Tabela 5.2.

A Figura 5.10 apresenta o diagrama de carga relativamente ao estudo 1, onde cada nível de potência e a duração caracterizam um evento. O eixo horizontal representa a duração do evento e o eixo vertical a potência consumida.

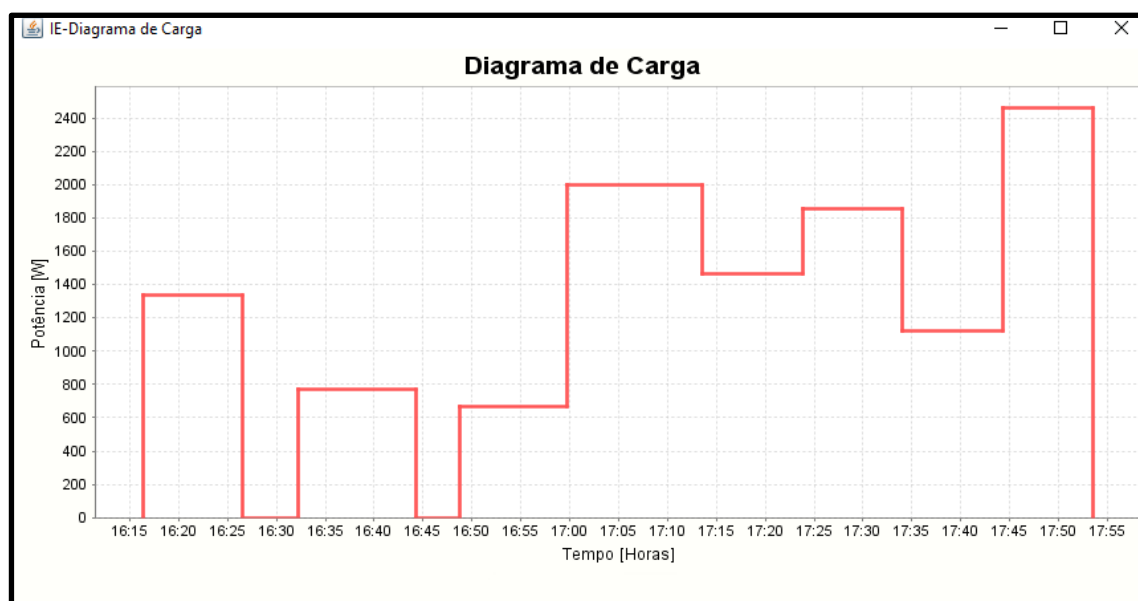


Figura 5.10-Diagrama de Carga correspondente à sequência de Eventos interpretada pelo IE, relativamente à Tabela 5.2.

Analogamente, apresentam-se na Figura 5.11 os eventos ocorridos e na Figura 5.12 o diagrama de carga correspondente ao estudo 2. Os agregados identificados, foram baseados na sequência de testes presente na Tabela 5.3.

IE-Interpretador de Eventos

quipamentos\Teste_DE_4_Equipamentos.bt [Abrir Ficheiro](#) [Diagrama de Carga](#) [Consultar Tarifas](#) Tarifa kWh: 0.1659 [Recalcular](#)

Potência [W]	Dispositivos	Data e Hora- ON	Data e Hora- OFF	Duracao [H]	Custo [€]	CO2 [Kg]
1350.6	Cafeteira	2017-05-29 14:53:53.0	2017-05-29 15:03:38.0	0.16	0.04	0.03
670.1	Tostadeira	2017-05-29 15:09:08.0	2017-05-29 15:19:13.0	0.17	0.02	0.02
446.85	Holofote	2017-05-29 15:24:28.0	2017-05-29 15:38:32.0	0.23	0.02	0.02
442.31	Ferramenta	2017-05-29 15:44:46.0	2017-05-29 15:58:44.0	0.23	0.02	0.01
1054.66	Tostadeira;Ferramenta	2017-05-29 15:58:44.0	2017-05-29 16:09:15.0	0.18	0.03	0.03
700.03	Holofote;Ferramenta	2017-05-29 16:09:15.0	2017-05-29 16:18:55.0	0.16	0.02	0.02
1360.47	Holofote;Tostadeira;Ferramenta	2017-05-29 16:18:55.0	2017-05-29 16:34:27.0	0.26	0.06	0.05
1626.83	Cafeteira;Ferramenta	2017-05-29 16:34:27.0	2017-05-29 16:44:32.0	0.17	0.05	0.04
2426.07	Holofote;Tostadeira;Cafeteira	2017-05-29 16:44:32.0	2017-05-29 16:58:31.0	0.23	0.09	0.08
2771.48	Holofote;Tostadeira;Cafeteira;Ferramenta	2017-05-29 16:58:31.0	2017-05-29 17:08:36.0	0.17	0.08	0.07

CO₂ 0.36kg

0.41€

Autor: João Gomes

Figura 5.11-Eventos interpretados pelo IE a partir dos eventos registados no estudo 2 pelo DE, Tabela 5.3.

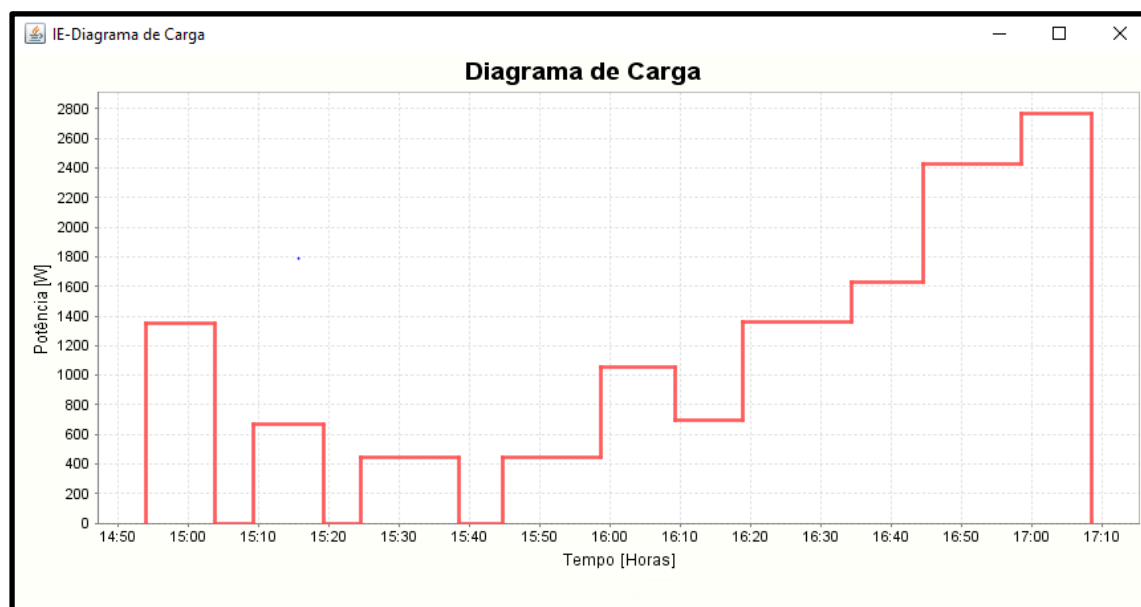


Figura 5.12-Diagrama de Carga correspondente à sequência de Eventos interpretada pelo IE, relativamente à Tabela 5.3.

Por fim, na Figura 5.13 é apresentada a sequência de eventos obtidos pelo DE para o estudo 3. Este último, representa o número máximo de dispositivos desagregados pelo MCE.

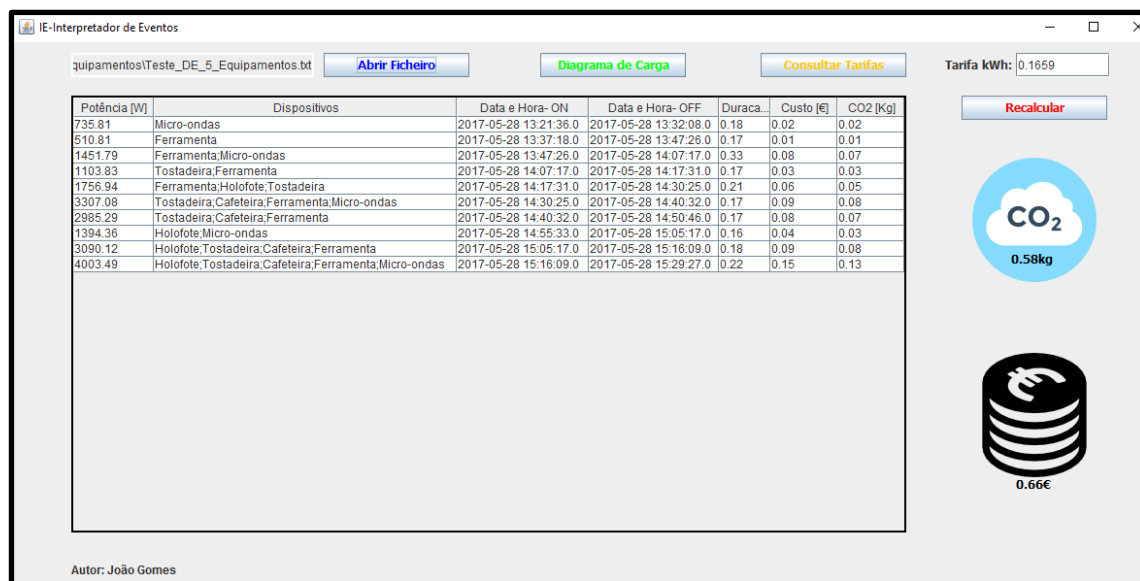


Figura 5.13-Eventos interpretados pelo IE a partir dos eventos registados no estudo 3 pelo DE, Tabela 5.4.

Tal como nos casos anteriores, a Figura 5.14 ilustra o diagrama de carga representativo dos eventos interpretados pelo IE.

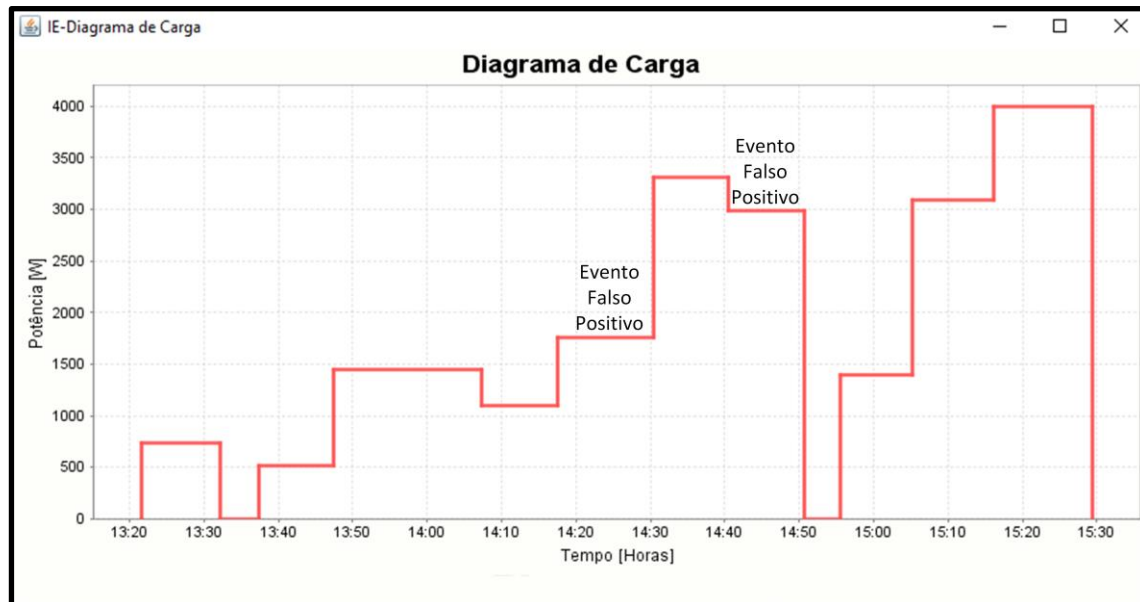


Figura 5.14- Diagrama de Carga correspondente à sequência de Eventos interpretada pelo IE, relativamente à Tabela 5.4

Durante o estudo 3 ocorreram deteções de falsos eventos, nomeadamente nos testes 5 e 7, onde foram detetados dispositivos que não faziam parte do agregado. A deteção desses falsos eventos pode ser confirmada na Figura 5.14. A potência associada ao falso evento não representa dispositivos que se encontram em operação. Por exemplo no teste 5, o agregado obtido presente na Tabela 5.4 constituído pela ferramenta eléctrica, holofote e tostadeira tem uma potência ativa aproximada de 1800 W. Este facto, leva a concluir que se trata de um falso evento pois a potência associada a este agregado numa situação real seria de 2000 W. A justificação para a ocorrência destas falhas, nomeadamente no teste 5 e 7 foi apresentada no subcapítulo 5.1.

Finalizando e avaliando todos os testes efetuados ao MCE ao longo dos 3 estudos, pode afirmar-se que este apresentou uma boa eficácia. Em todos os eventos aplicados no DE, apenas existiram a deteção de dois falsos eventos, embora se tenha obtido bons resultados com na validação do MCE. É espectável que, com o aumento do número de dispositivos o erro durante o processo de identificação dos mesmos também aumente.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo, é efetuada uma síntese do trabalho desenvolvido, e são apresentadas as conclusões, acerca das experiências efetuadas ao longo do capítulo 5. Após a síntese, são apresentadas as contribuições científicas, relacionadas com o método desenvolvido sendo este comparado às abordagens presentes na revisão de literatura efetuada no capítulo 2. Apresentam-se ainda os trabalhos futuros com as propostas que poderiam melhorar o sistema desenvolvido, aumentando a eficiência do mesmo.

6.1 Síntese

Atualmente, com o aumento demográfico a nível mundial a sociedade torna-se altamente consumidora de energia. O custo da energia e o impacto ambiental associado ao seu consumo são aspetos a considerar quer do ponto de vista social, quer económico. Desta forma, é importante sensibilizar a sociedade para o consumo excessivo de energia, levando-a a adotar hábitos capaz de reduzir a pressão sobre as fontes produtoras de energia e sobre as reservas de recursos energéticos, garantindo assim um futuro mais eficiente e sustentável. A monitorização de cargas em tempo real e o conseqüente aumento da eficiência energética, são elementos importantes para a resolução deste problema.

O sistema desenvolvido, denominado por MCE, é constituído por dois blocos. O primeiro bloco, designado por DE, é responsável por efetuar a monitorização de cargas e registar todos os eventos ocorridos. O segundo bloco, denominado de IE, tal como o nome indica interpreta os eventos ocorridos registados pelo DE, apresentando todas as informações associadas aos eventos através de uma interface gráfica com o utilizador.

Através dos resultados experimentais, verifica-se que MCE reconheceu corretamente todos os agregados efetuados com 3 e 4 dispositivos elétricos. Perante estes agregados o MCE esteve exposto a um universo de 8 e 16 combinações respetivamente, tendo 100 % de eficácia. No último estudo efetuado, o qual apresenta uma base de dados composta por 5 dispositivos, o MCE exibiu uma taxa de sucesso de identificação de 92 %. Durante os testes experimentais, observou-se a importância da não variação das assinaturas elétricas para uma correta identificação dos dispositivos, pois o método implementado apresenta elevada eficácia, mas apenas quando o comportamento elétrico dos dispositivos não varia. As boas capacidades de identificação resultam de conjugação da Transformada de *Fourier* com um algoritmo genético na desagregação dos dispositivos.

Em suma, a implementação do MCE com base na metodologia desenvolvida apresenta-se bem sucedida, obtendo bons resultados experimentais e cumprindo os objetivos propostos inicialmente.

6.2 Contribuições

A maioria dos métodos de monitorização de cargas citados no capítulo 2, utilizam para construção das suas assinaturas elétricas, dados de tensão e corrente, aumentando assim a complexidade e o nível de intrusão do sistema. Também em alguns dos métodos são utilizados processos de aprendizagem complexos (como por exemplo as redes neuronais), sendo necessário um período de aprendizagem para criação das assinaturas elétricas. Outro problema de difícil resolução é a desagregação de agregados compostos por múltiplos dispositivos em funcionamento, onde a maioria dos métodos não apresenta nenhuma solução.

A metodologia desenvolvida neste trabalho tenta responder de uma forma simples e eficaz a estes problemas, nomeadamente à desagregação de agregados compostos por vários dispositivos.

A utilização da Transformada de *Fourier* como assinatura elétrica em combinação com um algoritmo genético, permite que o MCE seja um dispositivo eficaz e de complexidade reduzida. O MCE permite apresentar, de forma detalhada, características dos eventos elétricos, isto é, consumos, tempo de funcionamento, custo da energia e emissões de CO_2 . Neste contexto de desagregação de múltiplos dispositivos, com uma reduzida complexidade e mantendo a eficácia de outros métodos, o MCE é um dos poucos sistemas existentes.

6.3 Trabalhos Futuros

O MCE não possui a capacidade de enviar dados remotamente, armazenando os mesmos num cartão micro SD do DE. Uma solução para este problema poderá passar por adicionar um módulo *wireless*, onde seria possível enviar os dados para um servidor permitindo o acesso direto a toda a informação por parte do IE.

Outra limitação da parte do DE, deve-se também ao facto de um sensor utilizado não possuir grande imunidade ao ruído. A solução passaria pela substituição de um sensor com uma resolução superior.

O algoritmo de desagregação implementado, apresenta alguns erros relacionados com pequenas variações nas assinaturas elétricas. De forma a solucionar esta questão e a aumentar a eficiência do método, seria importante acrescentar à assinatura elétrica (Transformada de *Fourier*) a magnitude de cada uma das principais harmónicas dos dispositivos.

Já na parte de interface, isto é no IE, existem limitações na parte das tarifas energéticas, sendo apenas utilizada uma tarifa fixa. Será importante colocar várias tarifas, permitindo ao utilizador calcular os custos associados a cada uma delas.

Seria ainda interessante, acrescentar uma nova janela ao IE capaz de sugerir alternativas de períodos de funcionamento em função das tarifas bi-horária e tri-horária, isto é, sugerir ao utilizador que efetue um determinado evento quando o preço da energia elétrica é reduzido, nomeadamente para os eventos com uma maior duração e maior consumo. Desta forma, seria possível efetuar uma monitorização mais eficiente.

Como último ponto, seria ainda interessante estudar o impacto do MCE no comportamento dos utilizadores, isto é, as mudanças provocadas pelo sistema do ponto de vista da eficiência energética e da redução dos custos, caso estas sejam significativas.

Referências

- [1] I. Abubakar, S. N. Khalid, M. W. Mustafa, H. Shareef, e M. Mustapha, «Application of load monitoring in appliances' energy management – A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 235–245, 2017.
- [2] P. C. Stern, «Individual and household interactions with energy systems: Toward integrated understanding», *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 1, pp. 41–48, 2014.
- [3] The Shift Project, «Breakdown of Electricity Generation by Energy Source», *The Shift Project*, 2014. [Em linha]. Disponível em: <http://www.tsp-data-portal.org/Breakdown-of-Electricity-Generation-by-Energy-Source#tspQvChart>. [Acedido: 23-Fev-2017].
- [4] J. Kneifel, «Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings», *Energy Build.*, vol. 42, n. 3, pp. 333–340, 2010.
- [5] D. Lee e C.-C. Cheng, «Energy savings by energy management systems: A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 760–777, 2016.
- [6] «Historical Energy Consumption Statistics | The Shift Project Data Portal». [Em linha]. Disponível em: <http://www.tsp-data-portal.org/Energy-Consumption-Statistics#tspQvChart>. [Acedido: 07-Jul-2017].
- [7] H. Najmeddine *et al.*, «State of art on load monitoring methods», *2008 IEEE 2nd Int. Power Energy Conf.*, n. PECon 08, pp. 1256–1258, 2008.
- [8] «G. W. Hart, “Nonintrusive Appliance Load Monitoring,” Proceedings of the IEEE, Vol. 80, pp. 1870-1891, 1992.»
- [9] Y. F. Wong, Y. Ahmet Sekercioglu, T. Drummond, e V. S. Wong, «Recent approaches to non-intrusive load monitoring techniques in residential settings», *IEEE Symp. Comput. Intell. Appl. Smart Grid, CIASG*, pp. 73–79, 2013.
- [10] N. F. Esa, M. P. Abdullah, e M. Y. Hassan, «A review disaggregation method in Non-intrusive Appliance Load Monitoring», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 66, pp. 163–173, 2016.
- [11] M. Figueiredo, «Contributions to Electrical Energy Disaggregation in a Smart Home», *PhD Thesis Dr. Progr. Inf. Sci. Technol. Dep. Informatics Eng. Fac. Sci. Technol. Univ. Coimbra*, n. September, 2013.
- [12] R. M. A. Lopes, «Monitorização não intrusiva de cargas, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa», 2012.

- [13] J. D. S. Guedes, D. D. Ferreira, e B. H. G. Barbosa, «A non-intrusive approach to classify electrical appliances based on higher-order statistics and genetic algorithm: a smart grid perspective», *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 140, pp. 65–69, 2016.
- [14] L. K. Norford e S. B. Leeb, «Non-intrusive electrical load monitoring in commercial buildings based on steady-state and transient load-detection algorithms», *Energy Build.*, vol. 24, n. 1, pp. 51–64, 1996.
- [15] H. H. Chang, P. C. Chien, L. S. Lin, e N. Chen, «Feature extraction of non-intrusive load-monitoring system using genetic algorithm in smart meters», *Proc. - 2011 8th IEEE Int. Conf. E-bus. Eng. ICEBE 2011*, pp. 299–304, 2011.
- [16] J. Powers, B. Margossian, e B. Smith, «Using a Rule-Based Algorithm to Disaggregate End-Use Load Profiles from Premise-Level Data», *IEEE Comput. Appl. Power*, vol. 4, n. 2, pp. 42–47, 1991.
- [17] L. Farinaccio e R. Zmeureanu, «Using a pattern recognition approach to disaggregate the total electricity consumption in a house into the major end-uses», *Energy Build.*, vol. 30, n. 3, pp. 245–259, 1999.
- [18] A. G. Ruzzelli, C. Nicolas, A. Schoofs, e G. M. P. O'Hare, «Real-Time Recognition and Profiling of Appliances through a Single Electricity Sensor. BT - Proceedings of the Seventh Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, SECON 2010, June 21-25, 2010, Bos», *IEEE Commun. Soc.*, pp. 279–287, 2010.
- [19] I. I. Conference e C. Electronics, «2011 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)», *Fraunhofer Cent. Sustain. Energy Syst.*, pp. 239–240, 2011.
- [20] C. Laughman, K. Lee, R. Cox, e S. Shaw, «Power signature analysis», *IEEE power*, 2003.
- [21] S. R. Shaw, S. Member, S. B. Leeb, L. K. Norford, e R. W. Cox, «Nonintrusive Load Monitoring and Diagnostics in Power Systems», vol. 57, n. 7, pp. 1445–1454, 2008.
- [22] A. Zoha, A. Gluhak, M. A. Imran, e S. Rajasegarar, «Non-Intrusive Load Monitoring Approaches for Disaggregated Energy Sensing: A Survey», n. 11m, pp. 16838–16866, 2012.
- [23] K. D. Lee, S. B. Leeb, L. K. Norford, P. R. Armstrong, J. Holloway, e S. R. Shaw, «Estimation of variable-speed-drive power consumption from harmonic content», *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, n. 3, pp. 566–574, 2005.
- [24] W. Wichakool, S. Member, A. Avestruz, S. Member, R. W. Cox, e S. B. Leeb, «Modeling and Estimating Current Harmonics of Variable Electronic Loads», vol. 24, n. 12, pp. 2803–2811, 2009.
- [25] D. Srinivasan, S. Member, W. S. Ng, A. C. Liew, e S. Member, «Neural-Network-Based Signature Recognition for Harmonic Source Identification», vol. 21, n. 1, pp. 398–405, 2006.
- [26] P. Meehan, C. McArdle, e S. Daniels, «An efficient, scalable time-frequency method for tracking energy usage of domestic appliances using a two-step classification algorithm», *Energies*, vol. 7, n. 11, pp. 7041–7066, 2014.

- [27] E. J. A. K. A. Folly, «ScienceDirect Overview of non-intrusive load monitoring and identification techniques Overview Overview of of non-intrusive non-intrusive load load monitoring monitoring and and identification identification techniques techniques», *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, n. 30, pp. 415–420, 2015.
- [28] M. Akbar e Z. Khan, «Modified nonintrusive appliance load monitoring for nonlinear devices», *Multitopic Conf. 2007. INMIC 2007.*, 2007.
- [29] F. Sultanem, «Using appliance signatures for monitoring residential loads at meter panel level», *IEEE Trans. Power Deliv.*, 1991.
- [30] K. Chahine, K. El, K. Drissi, e C. Pasquier, «Electric Load Disaggregation in Smart Metering Using a Novel Feature Extraction Method and Supervised Classification \$», vol. 6, pp. 627–632, 2011.
- [31] A. S. Bouhouras, A. N. Milioudis, e D. P. Labridis, «Development of distinct load signatures for higher efficiency of NILM algorithms», *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 117, pp. 163–171, 2014.
- [32] S. Gupta, M. S. Reynolds, e S. N. Patel, «ElectriSense : Single-Point Sensing Using EMI for Electrical Event Detection and Classification in the Home», *Univ. Washington, Seattle*, pp. 139–148, 2010.
- [33] H. Lam, G. Fung, e W. Lee, «A novel method to construct taxonomy electrical appliances based on load signaturesof», *IEEE Trans. Consum.*, 2007.
- [34] S. Inagaki, T. Egami, T. Suzuki, H. Nakamura, e I. Koichi, «Nonintrusive Appliance Load Monitoring Based on Integer Programming», *Electr. Eng. Japan*, vol. 174, n. 2, pp. 18–25, 2011.
- [35] Y. H. Lin, M. S. Tsai, e C. S. Chen, «Applications of fuzzy classification with fuzzy c-means clustering and optimization strategies for load identification in NILM systems», *IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst.*, pp. 859–866, 2011.
- [36] J. Leung, K. Ng, e J. Cheng, «Identifying appliances using load signatures and genetic algorithms», *Proc. Int. Conf.*, vol. Circuits a, 2007.
- [37] J. Liang, S. K. K. Ng, G. Kendall, e J. W. M. Cheng, «Load signature studypart I: Basic concept, structure, and methodology», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, n. 2, pp. 551–560, 2010.
- [38] J. L. J. Liang, S. Ng, G. Kendall, e J. Cheng, «Load signature study part II: Disaggregation framework, simulation and applications», *Power Energy Soc. Gen. Meet. 2010 IEEE*, vol. 25, n. 2, pp. 561–569, 2010.
- [39] Y. C. Su, K. L. Lian, e H. H. Chang, «Feature selection of non-intrusive load monitoring system using STFT and wavelet transform», *Proc. - 2011 8th IEEE Int. Conf. E-bus. Eng. ICEBE 2011*, n. 1, pp. 293–298, 2011.
- [40] C. Duarte, P. Delmar, K. W. Goossen, K. Barner, e E. Gomez-Luna, «Non-intrusive load monitoring based on switching voltage transients and wavelet transforms», *FIIW 2012 - 2012 Futur. Instrum. Int. Work. Proc.*, pp. 101–104, 2012.

- [41] H. H. Chang, K. L. Lian, Y. C. Su, e W. J. Lee, «Power-spectrum-based wavelet transform for nonintrusive demand monitoring and load identification», *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, n. 3, pp. 2081–2089, 2014.
- [42] J. F. Martins, R. Lopes, C. Lima, E. Romero-Cadaval, e D. Vinnikov, «A novel nonintrusive load monitoring system based on the S-Transform», *Proc. Int. Conf. Optim. Electr. Electron. Equipment, OPTIM*, pp. 973–978, 2012.
- [43] Y. Jimenez, C. Duarte, J. Petit, e G. Carrillo, «Feature extraction for nonintrusive load monitoring based on S-Transform», *2014 Clemson Univ. Power Syst. Conf. PSC 2014*, 2014.
- [44] U. Satija, M. Mohanty, e B. Ramkumar, «Automatic modulation classification using S-transform based features», *2nd Int. Conf. Signal Process. Integr. Networks, SPIN 2015*, pp. 708–712, 2015.
- [45] H. Y. Lam, G. S. K. Fung, e W. K. Lee, «A Novel Method to Construct Taxonomy of Electrical Appliances Based on Load Signatures», *Dep. Electr. Electron. Eng. Univ. Hong Kong*, 2007.
- [46] J. W. M. C. J.S.K. Leung, K.S.H. Ng, «Identifying appliances using load signatures and genetic algorithms», *Int. Conf. of Electrical Engineering*.
- [47] D. Beasley, D. R. Bull, e R. R. Martin, «An overview of genetic algorithms : Part 1, fundamentals», *Univ. Comput.*, vol. 2, n. 15, pp. 1–16, 1993.
- [48] J. Holland, «Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence», *Univ. Michigan*, 1992.
- [49] «Despacho (extrato) nº 15793-D/2013». [Em linha]. Disponível em: <https://www.academiaadene.pt/download/pt/despacho-15793-d2013-fatores-de-conversao.pdf>. [Acedido: 26-Jul-2017].